



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH.

ANALYSIS OF MODERN MILLING TECHNOLOGIES FOR SHAPED PARTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MICHAL PAVELEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2009

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá analýzou moderních technologií frézování tvarových ploch. Je zde realizováno rozdělení a definování tvarové plochy, popis a charakteristika jednotlivých technologií a metod výroby tvarových ploch frézováním. Dále jsou v této práci uvedeny stroje a nástroje používané při obrábění tvarových ploch. V závěru práce jsou zhodnoceny výhody a nevýhody frézovacích metod a jejich vzájemné porovnání.

Klíčová slova

Tvarová plocha, kopírovací frézování, HSC, tvrdé a suché obrábění, tvarová fréza, kulová fréza, obráběcí centrum, analýza.

ABSTRACT

The aim of my bachelor thesis is the analysis of modern milling technologies for shaped parts. The work offers the categorization and definition of shaped parts, and a description of the characteristics of milling techniques and methods used in the production of shaped parts. The work also describes the machines and tools used in the process of milling shaped parts. The last part of the paper offers the evaluation of each analyzed method, their comparing, and points out both their advantages and disadvantages.

Key words

Shaped surface, copy milling, High Speed Cutting, hard and dry cutting operation, shaped cutter, spherical cutter, machining centre, analysis.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVELEK, M. *Analýza moderních technologií frézování tvarových ploch*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 49 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Analýza moderních technologií frézování tvarových ploch vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 29. 5. 2009

.....
Michal Pavelek

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčikovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	5
Poděkování	6
Obsah	7
Úvod	9
1 Tvarová plocha	11
1.1 Rozdělení tvarové plochy dle použité metody výroby	11
1.1.1 Kopírovací frézování	11
1.1.2 Frézování tvarovými nástroji	11
2 Frézování tvarových ploch	12
2.1 Ruční frézování	12
2.2 Kopírovací frézování.....	13
2.3 Elektronické kopírovací frézování.....	13
2.4 NC - frézování	13
2.5 HSC technologie.....	14
2.5.1 Volba obráběcích strojů pro HSC	16
2.5.2 Volba nástrojů pro HSC.....	19
2.6 Frézovací postupy	21
2.6.1 Hrubování.....	21
2.6.2 Obrábění na čisto	22
2.6.3 Obrábění vnitřních rohů.....	23
2.6.4 Vstup a výstup břitu z řezu	23
2.6.5 Víceosé frézování	25
3 Frézování tvarovým nástrojem	26
3.1 Tvarové nástroje na ozubení	27
3.1.1 Frézování stopkovou (čepovou) modulovou frézou.....	27
3.1.2 Frézování kotoučovou modulovou frézou.....	27
3.1.3 Frézování dvěma kotoučovými nožovými hlavami	28
3.1.4 Frézování odvalovací frézou	29
3.1.5 Frézování čelní nožovou hlavou (způsob Gleason)	30
3.1.6 Frézování čelní nožovou hlavou (způsob Oerlikon)	30
3.1.7 Frézování kuželovou odvalovací frézou (způsob Klingelberg)	31
3.1.8 Přehled tvarových nástrojů pro výrobu ozubení	32
3.2 Tvarové nástroje pro výrobu závitu.....	33
3.2.1 Závitová kotoučová fréza	34
3.2.2 Závitová hřebenová fréza.....	34
3.2.3 Okružovací frézovací hlava	35
3.2.4 Stopkové závitové frézy	35
3.3 Tvarové nástroje pro drážky a jiné tvary.....	36
3.4 Výrobní stroje pro jednotlivé metody obrábění	38

3.4.1 Výrobní stroje používané pro výrobu ozubení	38
3.4.2 Výrobní stroje používané pro výrobu závitů	40
3.4.3 Výrobní stroje používané pro výrobu drážek	40
3.4.4 Vysvětlení pojmu 1D až 5D u frézovacích strojů:	40
4 Porovnání jednotlivých metod výroby tvarových ploch	42
4.1 Porovnání konvenčního a HSC frézování.....	42
4.2 Porovnání kopírovacího frézování a frézování tvarovým nástrojem	43
5 Závěr	44
Seznam použitých zdrojů	45
Seznam obrázků.....	47
Seznam tabulek.....	48
Seznam použitých zkratk a symbolů.....	49

ÚVOD

V období dvacátého století došlo k velmi výraznému rozvoji výrobních technologií a jim odpovídajícím výrobním strojům a zařízením. Frézování je obráběcí metoda, která spadá do technologie obrábění, které je jednou z velmi důležitých výrobních metod strojírenské technologie. Frézování se vyvíjí ve stále univerzálnější metodu obrábění a to díky rostoucí mnohostrannosti použití obráběcích stojů, řídicích systémů a řezných nástrojů. U obrábění kovů je důležité jako u ostatních postupů ve výrobě, aby výrobky byly konkurence schopné s ohledem na výrobní náklady. Pokud chce výrobce obstát v konkurenci, měl by stále zlepšovat výrobní proces. V obrábění znamenají velké a malé změny znatelné rozdíly výrobních nákladů na jednotlivé díly. Pod velkou změnou v obrábění si můžeme představit nákup nového CNC stroje, který zvýší výkon a rychlost obrábění, ale jeho návratnost je delší. Významného zlepšení obrábění je možno dosáhnout i mnohem jednodušším způsobem, než je investice do nového stroje, a to použitím správného řezného nástroje nebo použitím lepších břitových destiček. S nepřetržitým vývojem v oblasti strojů a řezných nástrojů dochází taktéž k vývoji nových technologií a metod frézování.

Tvarové plochy se často objevují ve všech strojírenských odvětvích, mnohé z nich mají významnou funkci u celé řady strojů. Jsou také nedílnou součástí všech nástrojů, výrobků a různých dílů.

Cílem práce je analýza moderních technologií frézování tvarových ploch. Porovnání jednotlivých metod a způsobu výroby tvarových ploch frézováním, metody, popis, analýza a vyhodnocení. Při zpracování práce se vycházelo ze studia problematiky z obecně známého zdroje, jako jsou skripta, články a internetové stránky zaměřené na strojírenství. Na základě těchto nastudovaných informací práce popisuje doposud používané a současné metody frézování tvarových ploch.

První kapitola se zabývá definicí tvarové plochy a rozdělením tvarových ploch dle použité metody frézování.

Druhá kapitola klade pozornost na frézování tvarových ploch metodou kopírovací, což je v dnešní době už historie. Dále pak metodou HSC neboli vysokorychlostním frézováním, které má oproti současnému konvenčnímu frézování výrazné výhody. HSC je moderní způsob vysoké produkce obrábění, který poskytuje výrobcům možnost produktivních řezných časů při lepší kvalitě povrchu s nižší výrobní cenou. V dnešní době je frézování tvarových ploch s využitím CAM systémů velice rozšířené. V této části jsou také popsány jednotlivé metody frézování, postupy frézovacích procesů, volba stroje pro daný typ obrábění a samozřejmě volba nástroje, která je také velmi důležitá.

Ve třetí kapitole je zahrnuto frézování tvarových ploch tvarovým nástrojem. Touto metodou se vyrábí normalizované tvary, jako jsou ozubení, závit, drážky, drážkování a nenormalizované tvary, u kterých se při velké sériovosti výroby vyplatí vyrobřit jednoúčelový tvarový nástroj. Důležité je, že všechny tyto nástroje mají tvar obráběné tvarové plochy vytvořen na hřbetu nástroje. Mimo to je zde uvedeno, jaké stroje a nástroje se používají při výrobě tvarových ploch tvarovým nástrojem.

Poslední kapitola je vyčleněna pro celkové zhodnocení obrábění tvarových ploch frézováním, jednotlivé srovnání popisovaných metod, posouzení výhod a nevýhod různých principů frézování. Vlastní pohled na vývoj do budoucna.

1 TVAROVÁ PLOCHA

Pod pojmem tvarová plocha si můžeme představit plochu různě definovaných tvarů. Tyto tvarové plochy je možno rozdělit na rotační a nerotační tvarové plochy, které se mohou nacházet ve 2D nebo 3D systému.

1.1 Rozdělení tvarové plochy dle použité metody výroby

1.1.1 Kopírovací frézování

Touto metodou frézování vyrábíme tvarové plochy, mezi které můžeme zařadit zápusky, formy, tvarově složité nástroje používané pro tvářecí operace např. lisování. Obrábění nejrůznějších druhů tvarových ploch se provádí na kopírovacích a CNC frézkách. U tohoto principu je důležité přenést tvar vyráběné součásti ať už u starších metod pomocí dotykového hrotu z šablony, nebo v současnosti převedení 3D modelu pomocí softwaru do řídicího systému stroje. Kopírovací frézování může být ve 2D nebo 3D systémech. Ve 2D systémech se jedná o rovinné tvary nebo taky řečeno různé tvary v ploše. Nástroje vhodné pro kopírování tvarů, mají pro obrábění a zvláště pro konstrukci nástrojů velký význam. Nástroje vhodné pro kopírování tvarů ve 3D (obecných tvarů) jsou stopkové frézy s půlkruhovými břity a stopkové frézy s kruhovými vyměnitelnými břitovými destičkami nebo monolitní. U těchto nástrojů se snažíme o vychýlení osy nástroje od svislé osy, abychom zabránili nulové rychlosti v ose nástroje. Nástroje vhodné pro kopírování tvarů ve 2D mohou být klasické válcové čelní frézy. (viz. kapitola 2)

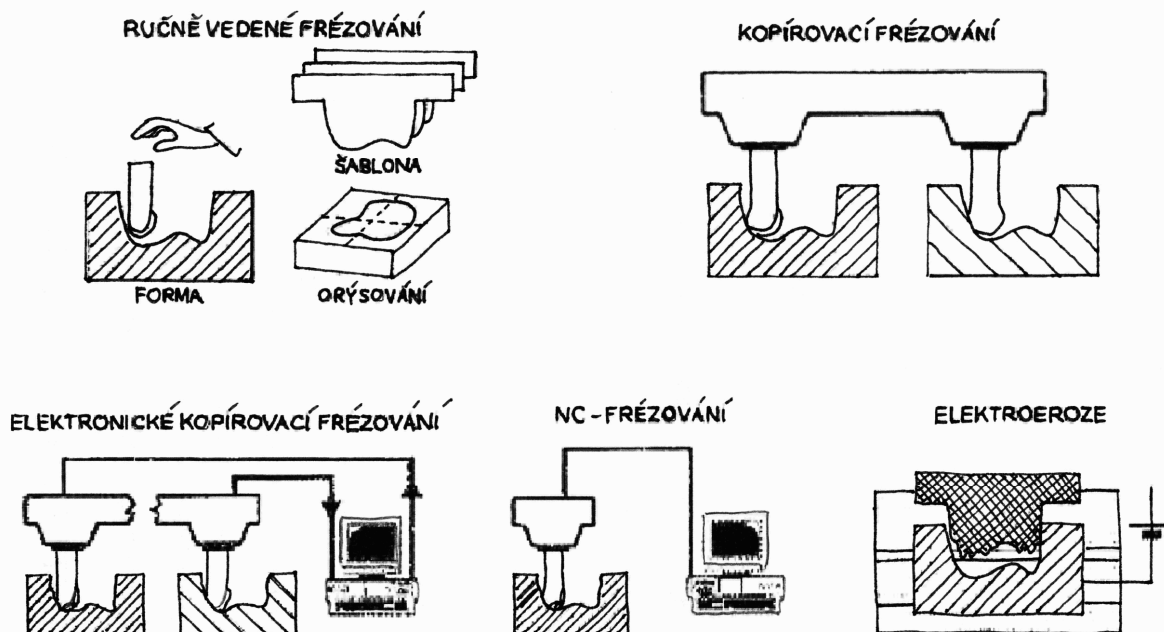
1.1.2 Frézování tvarovými nástroji

Tímto způsobem frézování vyrábíme tvarové plochy, mezi které můžeme umístit výrobu ozubení, závitů, drážek různých tvarů, rybinové vedení drážkování a mnoho dalších. Podstatné je, že všechny tyto nástroje mají požadovaný tvar obráběné tvarové plochy vytvořen na hřbetu nástroje jako část Archimédovy spirály. Tvarové nástroje mohou být kotoučové nebo čepové. (viz. kapitola 3)

2 FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝCH PLOCH

Tato kapitola je zaměřena na kopírovací frézování a HSC frézování, které se používá zejména pro výrobu forem a zápustek (3D systém).

V minulosti byly vyvinuty mnohé metody pro obrábění forem a zápustek, které můžeme rozdělit na třískové a nekonveční (obr. 1)



Obr. 1 Metody výroby forem a zápustek [6]

Z třískových metod se používaly nejčastěji tyto metody:

- Ruční vedené frézování
- Kopírovací frézování
- Elektronické kopírovací frézování
- NC – frézování

Ke konvečním metodám patří:

- Elektroerosivní
- Elektrochemické

V současnosti jsou nejčastěji využívány metody konvečního a elektronického kopírovacího frézování, respektive NC – frézování a elektroerosivního obrábění. [6]

2.1 Ruční frézování

U této metody byla geometrie formy uchována na výkrese a pomocí šablon byla orýsována na polotovar. Obrábění měl v popisu práce kvalifikovaný dělník, který obráběl „rukama“, popřípadě za pomoci hydraulické podpory. Pracovník obráběl tzv. řádkovací strategií, kdy odebíral souměrné vrstvy materiálu po

celém obvodu, další vrstvy pak odebíral v konstantní hloubce, o kterou se na začátku posunul. Přesnost a reprodukovatelnost tohoto způsobu byla poměrně nízká, protože řezné rychlosti v té době byli dosti malé. Navíc byla tato metoda nepoužitelná pro automatizovanou výrobu. Jako výhody u této metody můžeme považovat pružnost a adaptaci operátora. [6]

2.2 Kopírovací frézování

Tato metoda nám částečně umožňuje výrobu automatizovat. Princip metody spočívá v přenosu tvaru z fyzického modelu přes dotykový hrot pomocí elektro - mechanické nebo hydraulické - mechanické vazby na frézovací nástroj v reálném čase. Stroj využívaný u této metody se nazýval pantograf. Modely bývaly někdy i více násobně větší než skutečná součást a to proto, aby se zamezilo zbytečné nepřesnosti. Většinou se frézovalo na dvě etapy. V první etapě tzv. hrubovací řízení procesu realizoval kvalifikovaný dělník zpravidla rukou, kterou vedl dotykový hrot a v druhé etapě tzv. dokončovací (na čisto), je řízení procesu realizované automatizovaně na základě postupu kopírovacího frézování, která je většinou orientována vrstevnicově. Podstatnou nevýhodou tohoto způsobu je zpětná vazba od procesních sil na dotykový hrot. Absolutní přesnost je částečně omezena (dle použitého postupu) a reprodukovatelnost je většinou docela dobrá. [6]

2.3 Elektronické kopírovací frézování

Při této metodě se využívá přerušení vazby mezi dotykem a výrobním procesem neboli přesněji přímým obráběním. Díky tomu dochází ke zlepšení přesnosti vyráběných součástí a výraznější reprodukovatelnosti oproti klasickému kopírovacímu frézování. Princip metody spočívá v načtení modelu pomocí dotykového systému a následného digitalizování pomocí počítače. Obrábění je poté realizováno dle informací z počítače. V počítači také můžeme danou plochu částečně modifikovat (posouvat, otáčet, měnit měřítko atd.) [6]

2.4 NC - frézování

Rychlý vývoj CAD/CAM systému přináší v oblasti tvarových ploch plné využití NC-frézování. U této metody jsou geometrické informace rovnou v počítači matematicky popsány formou ploch či objemových modelů. Díky CAM části propojených se systémem je takto matematicky popsán model obroben v počítačové simulaci, která zároveň generuje dráhy nástroje a následně převede do jazyka NC – řízeného stroje. Tato metoda je v dnešní době hojně používána. Velká konkurence firem, které vyvíjí CAD/CAM systémy pro obrábění, je do značné míry výhodou, jelikož se vývoj technologií tímto dosti urychlí a posune vpřed. Vedle výrazné časové úspory nabízí tato metoda další výhody:

- Vysoká přesnost a reprodukovatelnost
- Relativní volnost při volbě frézovacího postupu

- Vhodnost i pro vysoké posuvové rychlosti
- Vysoká flexibilita k případným změnám

Vedle těchto výhod existují také určité nevýhody, jako např.:

- Náročné a drahé proškolení pracovníků
- Vysoká cena daných systémů
- Složité naprogramování optimálních procesních podmínek

Dalším poměrně častým způsobem výroby forem a zápusťek je elektroeroze. Využívá se tam, kde je výroba frézováním problematická nebo zcela nemožná a časová náročnost při použití metody elektroeroze nižší. Bližší popis této metody neuvádím, protože není v souladu se zadaným tématem.

Metodami, o kterých se dnes v praxi často diskutuje, jsou NC – frézování a elektroeroze, ale je možná také kombinace obou způsobů. Těmito způsoby je možno dosáhnout následujících možností:

- Elektroeroze
- Hrubovací frézování a následné dokončování elektroerozí
- Hrubování elektroerozí s následujícím dokončovacím frézováním
- Frézování

Vedle těchto základních kombinací existují další možnosti jako např. hrubování a frézování na čisto, elektroerozivní dokončení složité a speciální části atd. Výběr optimálního způsobu či kombinace všech těchto metod závisí na mnoha faktorech, např. geometrický tvar formy, obráběný materiál, stav materiálu (tepelné zpracování) a mnoho dalších. [6]

2.5 HSC technologie

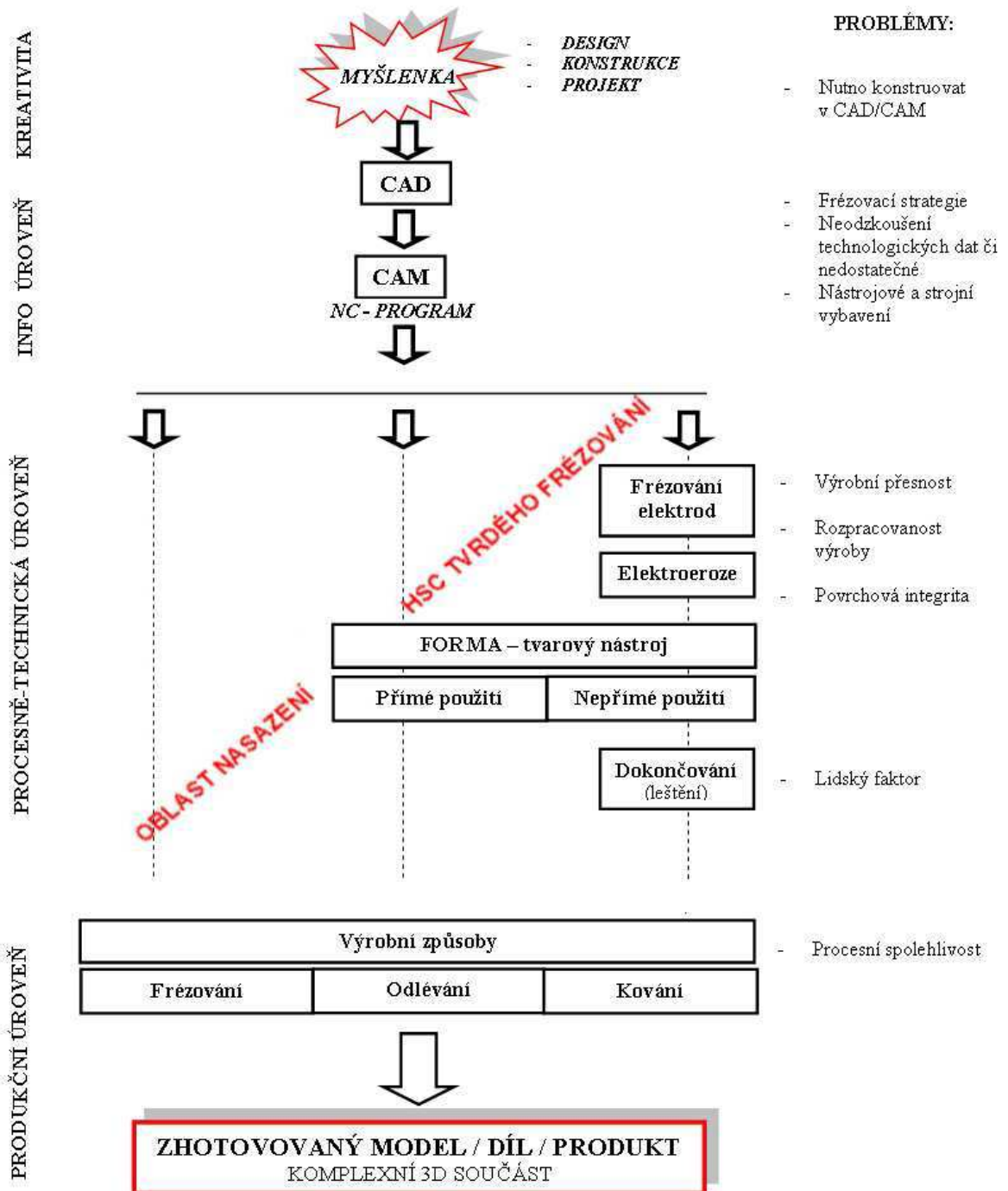
Mezi nové technologie obrábění lze považovat HSC technologie. Jedná se o vysokorychlostní obrábění i tzv. suché a tvrdé obrábění. Všechny tři technologie mají společný základ, který vyplývá z příbuznosti jevů řezného procesu při zvyšování řezné rychlosti.

Pod názvem suché obrábění si můžeme představit minimální využití procesních kapalin nebo dokonce vyloučení z obráběcího procesu, což nám redukuje náklady na jejich filtraci a recyklování.

Pod pojmem tvrdé obrábění si můžeme představit obrábění kalených ocelí a jiných velmi tvrdých materiálů nástroji s definovanou geometrií břitu náhradou za dříve využívanou technologii broušení.

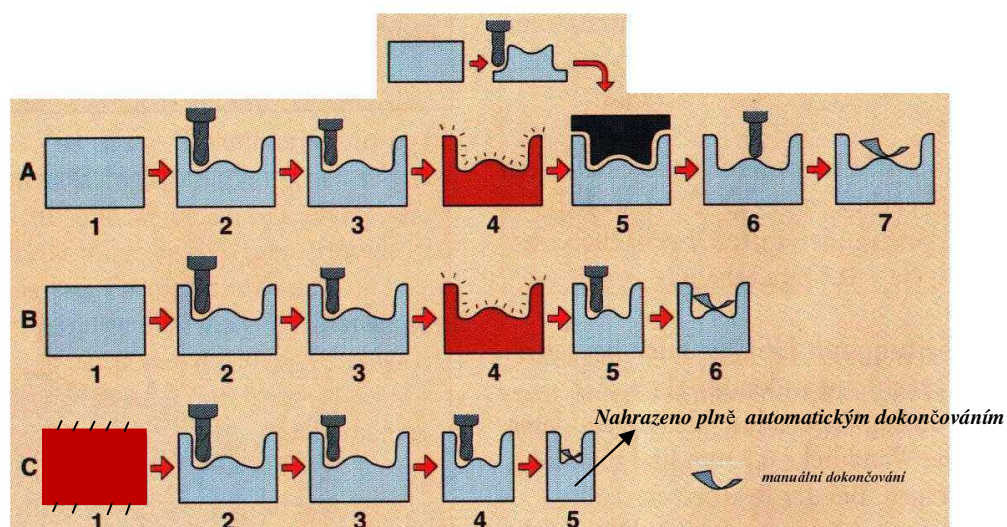
HSC technologie dodnes nemá přesně vymezenou definici, která by přesně popisovala a vystihla okolnosti mechanismu a způsob vlastního obrábění. Uvádí se např., že se jedná o vysoce výkonné obrábění, při kterém se dosahuje velkých objemů materiálu obrobeného za určitou časovou dobu, nebo že řezná rychlost při HSC dosahuje 5 až 10x větších hodnot než při konvenčním obrábění.

Na základě výrazně lepší hospodárnosti a produktivity frézování je dnes celosvětovým trendem přímá aplikace HSC tvrdého frézování pro výrobu forem a zápuštěk. Pro aplikovatelnost tvrdého frézování je přínosem vývoj vysoce výkonných a odolných řezných nástrojů. Na druhou stranu se nesmí opomenout na jednotlivé komponenty obráběcích strojů např. hlavní vřeteno, upínání nástrojů, které jsou díky větším rychlostem také více namáhány. Vývoj vysokorychlostních obráběcích strojů pro vysokorychlostní frézování je dnes už tak daleko, že překračuje požadavky z hlediska velikosti otáček vřetene a rychlostí posuvů v závislosti na přesnosti dráhy nástroje. [6, 11]



Obr. 2 Obecný pohled na použití HSC tvrdého frézování [6]

U výroby zápustek a forem konvenčními způsoby je součást tepelně zpracovaná až před dokončovací etapou. U výroby HSC technologií je součást tepelně zpracovaná ještě před vlastním obráběním tedy před etapou hrubovací (obr. 3). Cena tepelného zpracování, která se uvádí v Kč/kg resp. Kč/m³, přináší nepatrný nárůst nákladů u HSC metody, kde je tepelně zpracováván celý polotovár. Na druhou stranu při HSC můžeme obrábět celou součást na jedno upnutí, což zvyšuje přesnost výroby a snižuje časovou náročnost. Náklady vynaložené na tepelné zpracování většího objemu materiálu u HSC jsou dostatečně kompenzovány uspořenými náklady opětovného upínání, rozpracovaností výroby, mezi-dopravou u metod konvenčních. [6]



Obr. 3 Modelový příklad optimalizace procesního řetězce [6]

Legenda k obr. 3 [6]:

A) Tradiční proces.

(1) Nekalený polotovar, (2) hrubování, (3) předdokončení, (4) kalení na požadovanou tvrdost, (5) elektro-erozivní proces, (6) elektrodové frézování malých rádiusů a rohů, dokončování v místech s dobrou přístupností, (7) ruční dokončení nepřístupných míst

B) Stejný průběh jako A), ale elektro-erozivní proces je zde nahrazen dokončovací frézováním v režimu HSC (5), **úspora procesního kroku**

C) (1) Polotovar je rovnou zakalen na požadovanou tvrdost, (2) hrubování, (3) předdokončení a (4) dokončení. HSC lze obvykle použít u všech obrábění (speciálně u nástrojů s malým průměrem). Z toho vyplývá **Úspora dvou procesních kroků**. Ve srovnání s procesem A) činí časová úspora přibližně **30-40%**.

2.5.1 Volba obráběcích strojů pro HSC

Volba obráběcích center pro vysokorychlostní frézování je dosti složitou problematikou, kterou se zabývá řada výrobců a vědeckovýzkumných týmů. Konstrukce těchto zařízení sleduje hlavní cíle HSC, které jsou: zvýšení výkonu, zvýšení kvality obrobeneho povrchu a životnosti nástroje vyššími otáčkami a posuvy při zmenšené hloubce řezu, snížení sil řezání a snížení tepelného

ovlivnění obrobku. Např. lože strojů pro tyto metody obrábění bývají velmi tuhé a tříbodově uloženy. Přenos řezné síly do lože a stojanu probíhá po nejkratší dráze, bohatě dimenzovaná kuličková vedení slouží k pohybu v osách x, y, z. Vřetena jsou oboustranně uložena a teplotně stabilizovaná. Odstředivé mazání zajišťuje vysokou přesnost a tepelnou stabilitu. Nedílnou součástí obráběcích strojů bývá řídicí systém nejvyšší třídy, zajišťující bezproblémovou komunikaci s CAD/CAM systémy. Největším problémem u těchto strojů jsou maximální otáčky vřetene, jelikož při výrobě tvarově složitých forem používáme malé nástroje, je nutné, aby se otáčky vřetene pohybovaly v desítkách tisících za minutu. U většiny obráběcích center se tento problém řeší použitím „zrychlovacích“ vřeten, které nám sice umožňují vysoké otáčky, ale jsou omezeny upínacími průměry a také v neposlední řadě znamenají nákladové zatížení. [6, 11]

Mezi některé typické parametry stroje pro HSC frézování patří [6]:

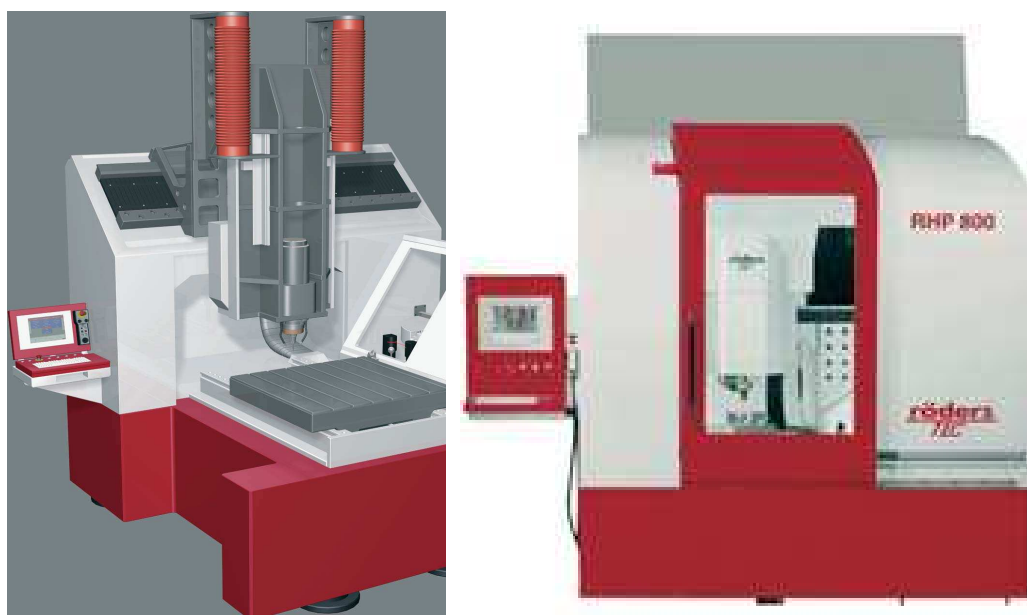
- Rozsah otáček vřetene ≈ 40000 ot/min
- Výkon hlavního vřetene > 20 kW
- Programovatelný posuv $20 - 60$ m/min
- Rychloposuv ≥ 90 m/min
- Zrychlení/zpomalení $> 0,5$ g (rychlé lineární motory)
- Rychlost zpracování programového bloku $1 - 20$ ms
- Horizontální koncepce s více řízenými osami
- Vysoká tepelná stabilita a tuhost vřetene – vysoké předpětí a intenzivní chlazení ložisek vřetene

Stroje pro HSC frézování jsou většinou koncipovány jako CNC horizontální a vertikální, popřípadě kombinovaná obráběcí centra, tříosé nebo pětioké, stroje jednovřetenové nebo vícevřetenové, sériové nebo paralelní struktury rámu. Je zřejmé, že pro jednotlivé technologie je důležitější volba vřetene a vhodného nástroje, než volba stroje. Trendem současnosti je nechat postavit si stroj pro HSC obrábění přímo na zakázku dle svého požadavku, což umožňuje stavebnicové konstrukční řešení stroje. [11, 7]

Německá firma Röders Tec se zabývá výrobou obráběcích center pro HSC technologie, speciálně pro výrobu forem. Jako příklad uvádím obráběcí centrum RHP 800.

Parametry obráběcího centra RHP 800:

Jedná se o tříosé obráběcí centrum, které je určeno pro výrobu forem a nástrojů. Umožňuje kombinaci pracovních operací jako HSC frézování, souřadnicové broušení a měření při upnutí. K dispozici je zásobník nástrojů s 30 nebo 54 místy. Hydrostatické vedení, přímé lineární motory, řídicí systém, sledování teploty stroje zaručují maximální přesnost. Tento stroj je opatřen 17 kW vřetenem s otáčkami $36\,000\text{ min}^{-1}$ (obr. 4). [13]



Obr. 4 Obráběcí centrum RHP 800 [21]

Konkurence firmy Röders Tec ve výrobě HSC obráběcích strojů je firma Fine tech. Její obráběcí centra k nám do české republiky distribuuje firma Jirka & spol. Jako příklad uvádím obráběcí centrum HSD 820

Parametry obráběcího centra HSD 820:

Frézovací HSC centra řady HSD splňují dnešní požadavky na výrobu forem. Stroj je konstruovaný pro dosažení vysokých hodnot a nízkých harmonických vibrací, vysokou přesnost a velmi hladkých povrchů. Tuhá konstrukce stroje umožňuje využít vysoce dynamické AC pohony. Tento stroj je opatřen 15 kW vřetenem s otáčkami $30\,000\text{ min}^{-1}$ (obr. 5). [22]



Obr. 5 Obráběcí centrum HSD 820 [22]

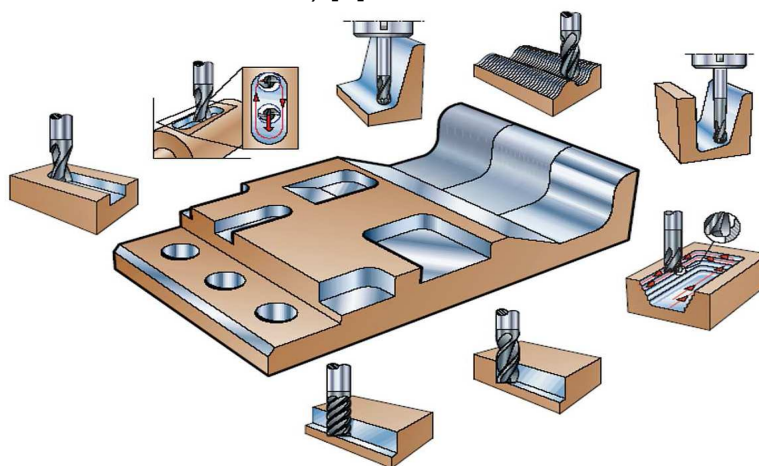
2.5.2 Volba nástrojů pro HSC

Vývoj nových typů řezných nástrojů, inovace stávajících druhů, rozšiřování sortimentu z hlediska řezných materiálů, rozměrového i typů, patří k důležitým předpokladům úspěchu výrobců moderních nástrojů na současném trhu. Progresivní řezné nástroje by měly charakterizovat nejen prvotřídní technické parametry, ale současně i široké aplikační možnosti v souladu s potřebami uživatelů a celkového trhu. Nástroje používané u vysokorychlostního obrábění lze rozdělit dle jejich konstrukce, řezného materiálu a povlakování. [6, 8]

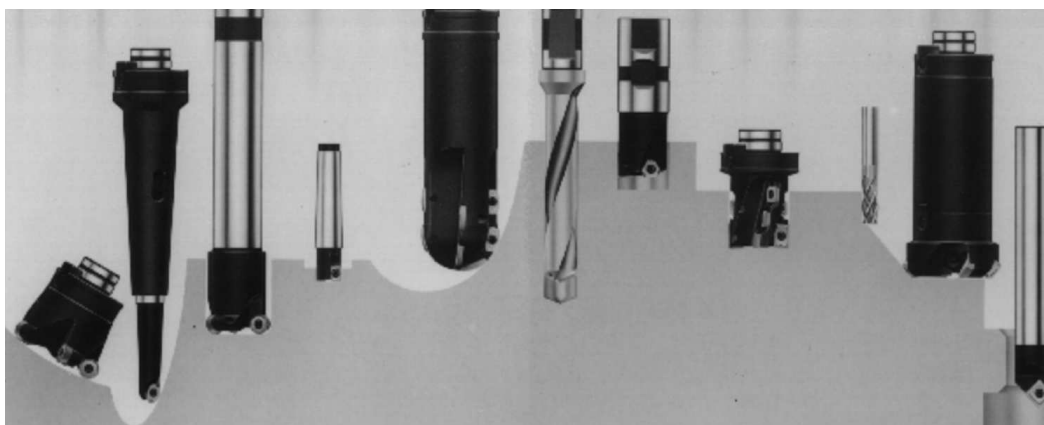
Konstrukční řešení nástrojů pro HSC

Frézovací nástroje využívané při HSC technologiích jsou namáhány vysokými odstředivými silami při vysokých otáčkách. Otáčky jsou tak vysoké, že odstředivé síly u větších fréz značně namáhají základní těleso nástroje, upnutí břitové destičky a materiál břitu. Větší frézy jsou konstruovány jako frézovací hlavy s VBD. Využití konvenčních nástrojů je u HSC technologií nevhodné, ba dokonce nebezpečné, protože při ulomení nástroje může dojít ke zničení stroje, nebo dokonce ke zranění obsluhy. Pro konstrukci nových rotačních nástrojů pro HSC technologie platí, že pro vyloučení možnosti náhlého lomu nástroje následkem mechanických nebo tepelných šoků a pro snížení opotřebení nástroje, musí mít řezné materiály vysokou povrchovou tvrdost, houževnatost a vysokou odolnost proti chemickému opotřebení. Tyto všechny vlastnosti by měli nejlépe mít i při vysokých teplotách a těžkých záběrových podmínkách řezného procesu.[6, 11]

Jako další skupinu nástrojů používaných při HSC obrábění zápustek a forem, jsou letmo uložené delší frézy menších průměrů monolitické nebo s VBD, jejichž konstrukce se netýká výše uvedených vlastností, ale je podřízená jiným pravidlům. U těchto nástrojů je snaha zvýšit jejich tuhost. Díky zavedení kuželového tvaru upínací části se to celkem daří. Pevnost v ohybu je závislá na délce nástroje. Vhodný nástroj se tedy volí v závislosti na podmínkách obrábění (způsob obrábění, řezná rychlosti, materiál obrobku, rychlost posuvu velikost úběru atd.) [6]



Obr. 6 Provedení nástrojů pro obrábění forem a zápustek [6]



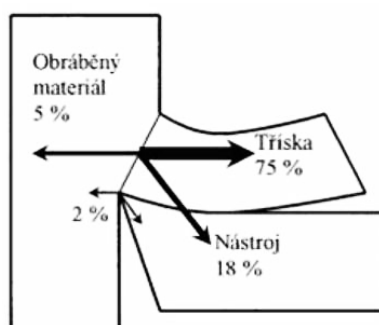
Obr. 7 Další provedení nástrojů pro obrábění forem a zápustek [6]

Řezné materiály nástrojů pro HSC

Důležitým faktem při volbě řezného materiálu je zajistit pro konkrétní dvojici obráběného a řezného materiálu dostatečnou tvrdost nástroje proti obráběnému materiálu v rozsahu procesních teplot. Vývoj moderních řezných materiálů směřuje k vysoce výkonným řezným nástrojům, které si zachovávají řezivost i při vysokých řezných rychlostech. Pro vysokorychlostní obrábění ocelí použijeme jako řezné materiály povlakované karbidy, cermety a řeznou keramiku, pro litinu použijeme keramiku, pro neželezné materiály použijeme polykrystalický diamant a k obrábění kalených ocelí a litiny kubický nitrid boru (CNB). [6, 11]

Povlakování nástrojů pro HSC

Povlakování znamená nanášení vysoce otěruvzdorných a teplotně odolných tvrdých vrstviček na břity nástrojů, které snižují tření mezi břitem a obrobkem (třískou) a také mění tepelný režim v oblasti vzniku třísky a břitu. Izolační účinky povlakování snižují tepelné zatížení substrátu břitu a zároveň zvyšují část tepla odváděného třískou (obr. 8). V praxi se využívá metoda povlakování PVD (physical vapour deposition), metoda CVD (chemical vapour deposition) a MT-CVD (MT- střední teplota, tato metoda má oproti konvenčnímu CVD až 3x vyšší soudržnost). Pro HSC musí být systémy povlaků s co nejmenší tloušťkou, často < 10 μm , jelikož větší tloušťky zvětšují zaoblení ostří, což negativně působí na celý řezný proces. [6, 7]



Obr. 8 Poměrové rozložení odcházejícího tepla [11]

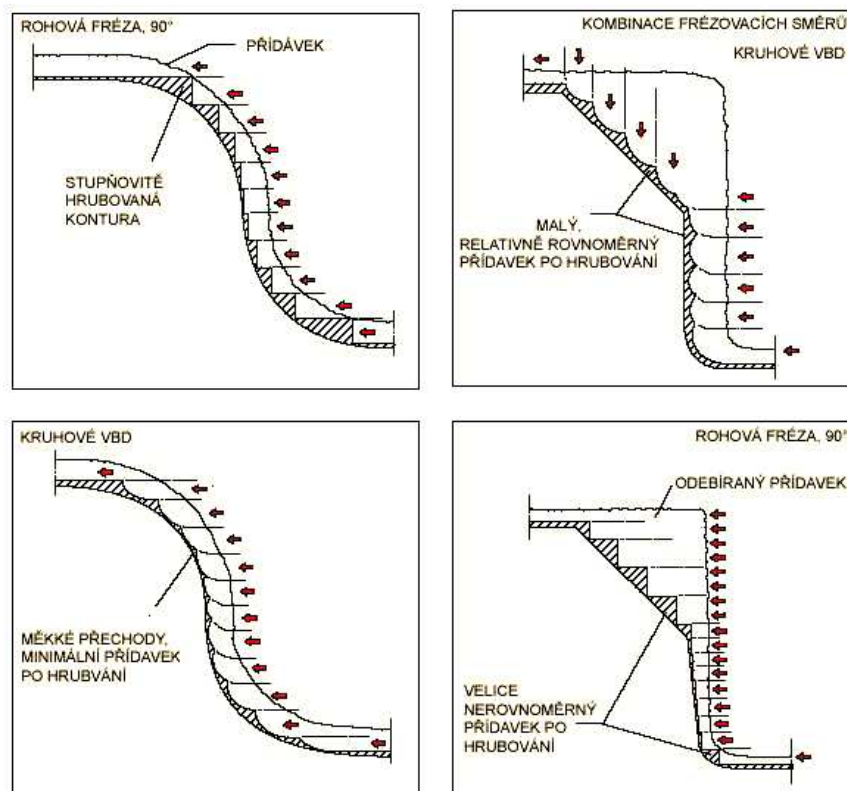
2.6 Frézovací postupy

Obrábění se obecně rozděluje na hrubování a obrábění na čisto – dokončování. Pod pojmem hrubování si můžeme představit co nejrychlejší odstranění největšího množství materiálu, přičemž dochází k přiblížení k zhotovenému obrysu při zachování přídatku na čisto pro danou plochu. Cílem dokončování je zhotovit cílový tvar rychle a co nejpřesněji. Pro oba kroky se volí většinou jiné nástroje a rozdílné postupy frézování. [6]

2.6.1 Hrubování

Cílem hrubování je co nejrychleji a nejhospodárněji odebrat velké množství materiálu a přiblížit tím obrys pro následné dokončování. Při použití nástrojů s kruhovým tvarem břitu se dosahuje výrazně lepšího přiblížení k cílovému obrysu, než s břity s určitými úhly, ale na procesní řízení jsou obtížnější. Výhodou kruhových VBD je jejich plynulý záběr. Jsou využívány při víceosém obrábění tvarových ploch a lze s nimi kombinovat klasické frézování s torickým. Důležitým předpokladem při frézování oceli je kontinuální a sousledný záběr břitu frézy.

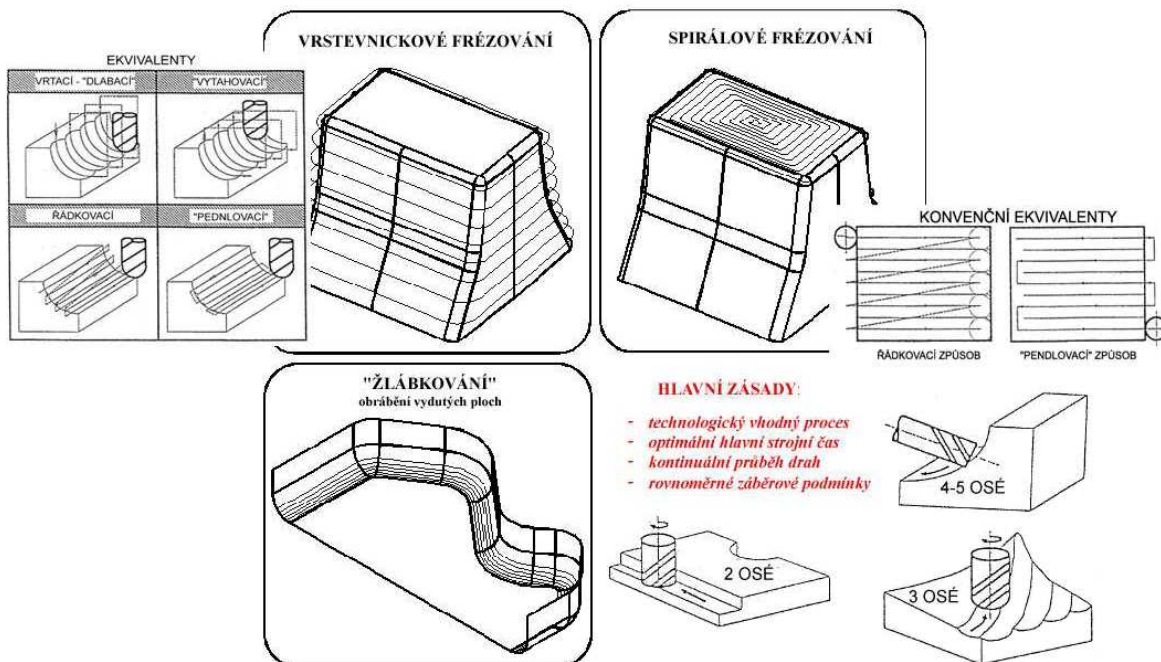
Při vysokorychlostním obrábění nástrojových ocelí se nejvíce osvědčilo tzv. spirálové kapsovací frézování, při kterém je obrys zhotovován ve spirálových drahách a lze zde dodržet rovnoměrné záběrové podmínky. U odebrání materiálu v rozích je vedle strategie nutno optimalizovat také způsob najetí břitu do řezu. Toto najetí u otevřených kontur závisí na poloměru přiblížení. U uzavřených kontur se využívá tzv. plochého najetí pod určitým úhlem. [6, 10]



Obr. 9 Různé příklady hrubovacích postupů [6]

2.6.2 Obrábění na čisto

Obrábění na čisto se využívá jako dokončovací operace obrábění. Ze všeobecně známých důvodů se u obou typů obrábění, jak u hrubování tak i na čisto, má využívat sousledného způsobu frézování. K optimalizaci bylo vyvinuto mnoho frézovacích postupů, které jsou voleny dle příslušné obráběné plochy.



Obr. 10 Optimální frézovací postupy při obrábění na čisto [6]

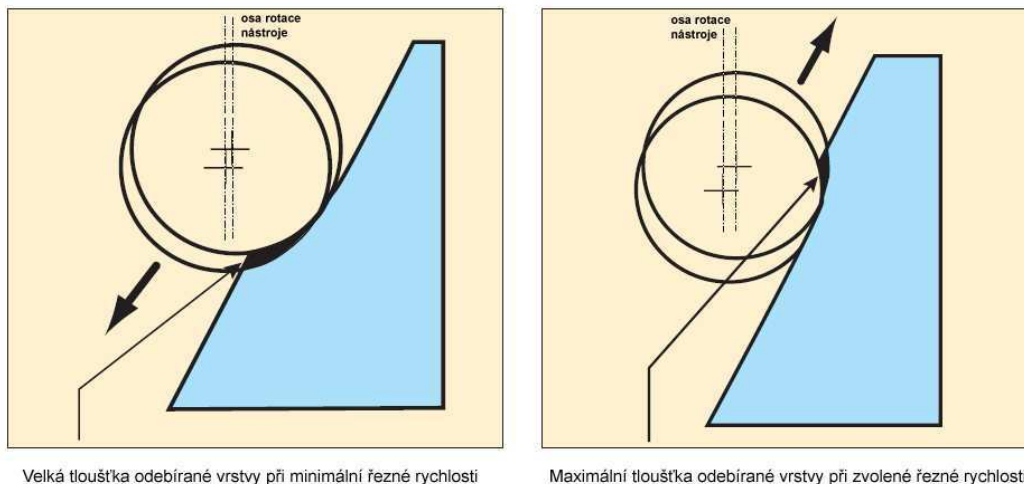
Spirálové frézování zachovává stálé záběrové podmínky a je výhodnější použít pro samostatné plochy nebo soubory ploch, jejichž sklon je velice malý či nulový. Důležité je snažit vyvarovat se prudkým změnám směru pohybu nástroje a záběrovým podmínkám.

Vrstevnicovým frézováním mohou být obráběny plochy přechodové, plochy navazující od nich směrem nahoru a také překrývající plochy ve směru vrstevnic, čímž jsou dodrženy kontinuální dráhy nástroje bez výrazných změn směru a s konstantními záběrovými podmínkami.

Vedle těchto všeobecně použitelných postupů potřebujeme speciální NC funkce k obrábění problematických ploch, jako jsou např. vnitřní rohy nebo úzké a hluboké dutiny. Jako optimální technologicky způsob pohybu nástroje je považován řízený pohyb na dané přídávky, přičemž jsou zanechávány přídávky ve směru pohybu nástroje respektive daných koutů (žlábkování).

V případě kdy není vhodné nasazení některého dříve uvedeného postupu u šikmých ploch, je použito využívání co největší řezné rychlosti na nástroji, kterou dosahujeme při správné orientaci směru pohybu nástroje vůči sklonu stěny. Díky tomu se musí programovat pohyb nástroje tak, aby maximální tloušťka odebírané vrstvy byla odebírána na co největším průměru nástroje vůči

jeho vertikální ose (obr. 11). Tyto problémy jsou v dnešní době řešeny pomocí pětiosého řízení naklápění nástroje u moderních obráběcích center. Při použití kulových fréz se díky tomu vyhneme jejich slabému místu – středu s nulovou řeznou rychlostí. [6, 10]



Obr. 11 Porovnání postupů pro obrábění šikmých ploch [6]

2.6.3 Obrábění vnitřních rohů

Běžným způsobem obrábění rohů je lineárním pohybem nástroje. Nevýhodou tohoto způsobu je nerovnoměrný záběr nástroje. Velmi často se používá nástroj, jehož průměr odpovídá obráběnému rádiusu daného rohu, což způsobuje mnohé komplikace. Při lineárním pohybu dochází k zastavení pohybu ve zlomovém bodě, i když jen na krátkou dobu. Toto zastavení pohybu je z důvodu změny směru posuvu při zachovaných otáčkách nástroje. Všechny tyto příčiny mají za následek zvýšení třecího tepla a náchylnost k vibracím, kterými bývá poškozován jak nástroj, tak i obráběný povrch (jeho drsnost a přesnost). Tímto vším neúměrně namáháme nástroj, který se při větších hodnotách přídatku v rohu může zlomit.

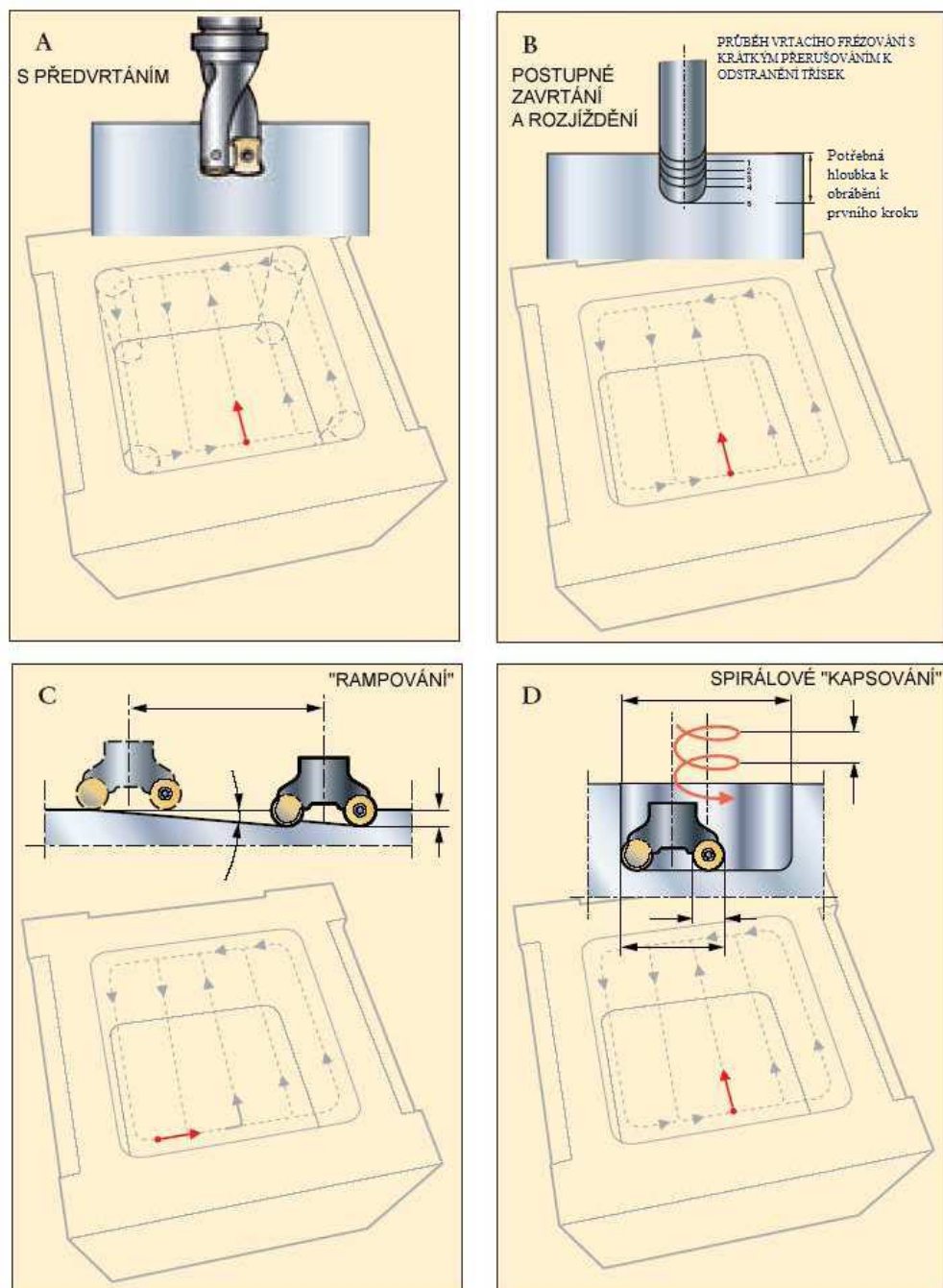
Jedno z jednoduchých řešení spočívá v použití nástroje, jehož průměr je menší než rádius obráběného rohu. Touto volbou nástroje můžeme využít obrábění kruhovou interpolací a tím se vyhnout zlomovému bodu a dalším navazujícím komplikacím. V dnešní době je prozatím méně používanou alternativou odebrání materiálu v rozích axiální frézování, které potřebuje perfektní programovací techniku (tzv. spline – řízení) a víceosý obráběcí stroj. [6, 10]

2.6.4 Vstup a výstup břitu z řezu

Pokaždé, když břit frézy vstupuje do záběru, je vystaven tzv. šokovému zatížení. První kontakt obrobku s břitem může ovlivnit celý následující proces řezání a dokonce může způsobit destrukci břitu. U obvodového vstupu do řezu všeobecně platí, že je lepší, když střed destičky resp. plocha čela je první v kontaktu s obrobkem. Při vyjíždění z řezu může být VBD namáhána tlakově,

tahově nebo dokonce ohybově. Vůči tlakovému namáhání je VBD z SK velmi odolná, ale při tahovém či ohybovém namáhání má velmi nízké hodnoty pevnosti a dochází k porušení či dokonce k destrukci destičky.

U čelního najíždění do řezu je hojně využívanou metodou předvrtání počátečního otvoru na žádanou hloubku dutiny. Poté použijeme klasickou frézu např. s VBD, s kterou provedeme při konstantní Z – souřadnici předfrézování dané kontury. Za jednu z nejlepších metod se pokládá lineárně šikmé najíždění na plnou axiální hloubku prvního kroku tzv. rampování. Hlavním problémem všech těchto metod je odstraňování třísek z řezu. [6, 10]

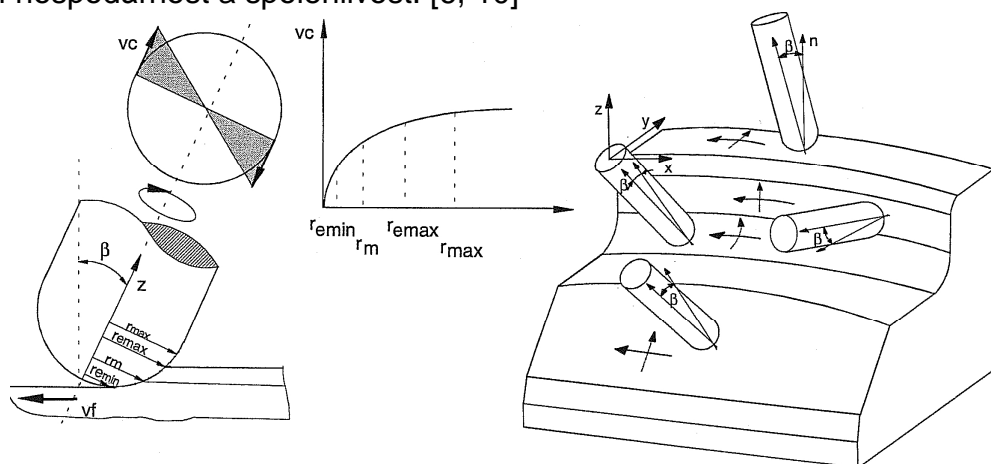


Obr. 12 Metody najíždění do řezu [6]

2.6.5 Víceosé frézování

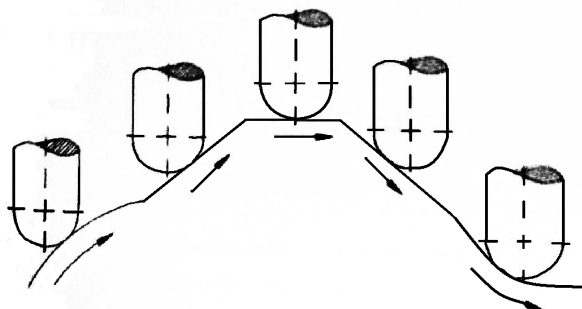
U klasického tříosého obrábění máme osu nástroje pevnou. Interpolace při obrábění tvarových ploch je prováděná jen prostřednictvím tří lineárních pohybů. Díky tomu je výrazně jednodušší NC programování, ale při použití stopkové frézy s čelními půlkruhovými nebo kruhovými břity, dochází k nepříznivým záběrovým podmínkám, které s nulovou rychlostí v ose nástroje mají nežádoucí vliv na celý řezný proces.

Tuto nevýhodu můžeme vyloučit použitím víceosého frézování, tzv. naklápěním nástroje ve směru čtvrté popřípadě páté osy. Velikosti úhlů naklápění pro HSC frézování tepelně zpracovaných nástrojových ocelí byli stanoveny dle několikaletých výzkumů. Z hlediska procesní spolehlivosti, opotřebení břitu, přesnosti a drsnosti obráběné plochy bylo vyzkoumáno nejvýhodnější naklonění nástroje o 10° až 20° do směru posuvu, které platí pro sousledné frézování. Tomuto způsobu se také říká tzv. *vlečení nástroje* (obr. 13). Stopkové frézy s vyměnitelnými břítovými destičkami se používají zejména pro hrubování a střední obrábění. Přesně vybroušené monolitní frézy nebo frézy s pájenými břity ze slinutého karbidu (SK) slouží k obrábění na čisto. Moderní stopkové frézy s čelními půlkruhovými břity jsou mnohostranně použitelné a nabízí uživateli podstatné výhody při obrábění. Mezi tyto výhody patří hospodárnost a spolehlivost. [6, 10]



Obr. 13 Význam využití víceosého frézování [6]

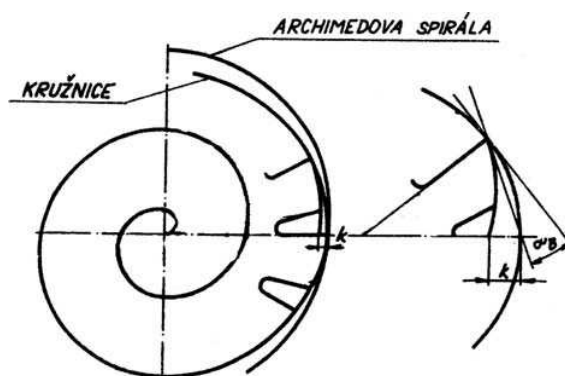
K typickým příkladům obrábění kulovou frézou patří frézování konvexní plochy, zešikmení zdola nahoru, rovinné plochy, zešikmení shora dolů, konkávní plochy a frézování po vrstevnicích (obr. 14). [8]



Obr. 14 Typické příklady obrábění kopírovací frézou [8]

3 FRÉZOVÁNÍ TVAROVÝM NÁSTROJEM

Podle provedení zubů rozlišujeme frézy se zuby frézovanými nebo podtáčenými (hřbetní plocha je vytvořena podsoustružením nebo podbroušením). U tvarových fréz se využívají zuby *podsoustružené*. Tyto zuby mají hřbetní plochu vytvořenou jako část Archimédovy spirály (obr. 15). Ostření zubu se provádí na čele, které je tvořené rovinnou plochou. Ostření bychom mohli provádět i na hřbetě zubu, ale v tomto případě by to byl velmi složitý proces, tedy zbytečný. Výhodou podsoustružených zubů na rozdíl od frézovaných je, že při ostření na čele se jejich profil mění jen velmi málo. Tvarové frézy se používají k výrobě tvarů na součásti, jejichž tvar jim odpovídá. U tvarových nástrojů pro ozubení odpovídá nástroj tvaru zubové mezery. Tvar obráběné tvarové plochy je vytvořen na hřbetu nástroje. [1, 5]



Obr. 15 Základní tvar zubů frézy - podtáčená plocha [5]

Základní tvarové plochy:

- *Normalizované plochy:*
 - kruhy, půlkruhy, konkávní, konvexní, evolventy, cykloidy, epicykloidy.
- *Nenormalizované plochy:*
 - mohou být jakékoliv tvary např. různě tvarované drážky, drážkování atd.

Rozdělení tvarových nástrojů:

- *Tvarové nástroje na ozubení:*
 - jednodílné: kotoučové nebo stopkové
 - víceprofilové (hřebenové): kotoučové
 - čelní nožové hlavy
- *Tvarové nástroje pro výrobu závitů*
 - jednodílné: kotoučové
 - víceprofilové (hřebenové): kotoučové
 - stopkové závitové frézy
- *Tvarové nástroje radiusové, drážkové a úhlové*
 - stopkové, nástrčné a čelní frézy

3.1 Tvarové nástroje na ozubení

Obrábění ozubení představuje značně složitý proces, který souvisí s požadavkem na spolehlivý odval hotového soukolí. Dosahovanou přesnost při obrábění ozubení ovlivňuje obzvlášť kinematika obráběcího procesu, do které zahrnujeme nástroj, technologické základny, upnutí obrobku a rezné prostředí.

Výroba čelních kol, se řadí na první místo mezi nejčastěji vyráběnými ozubenými koly. V menším počtu vyrobených kol se vyrábí kuželová kola s přímými, šikmými a zakřivenými zuby. Ve stejném pořadí roste technologická náročnost výroby ozubených kol. [1]

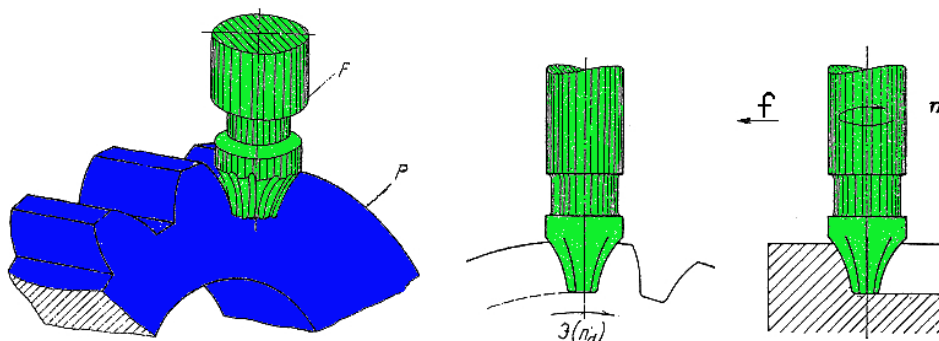
Volba vhodného způsobu výroby ozubení závisí:

- na přesnosti ozubení
- na druhu a velikosti ozubených kol
- na výrobních možnostech podniku
- na materiálu ozubených kol

3.1.1 Frézování stopkovou (čepovou) modulovou frézou

Tato tvarová fréza se využívá pro frézování ozubení dělicím způsobem u čelních kol s přímými, šikmými, šípovými nebo lomenými zuby, je-li modul větší než 20 mm. Čepovou frézou (obr. 16) lze vyrobít i ozubení se zakřivenými zuby, ale ozubené kolo se musí přitom natáčet kolem své osy. Stopkové modulové frézy pro hrubování ozubení s modulem $m > 30$ mm mají lichoběžníkový profil a bříty ve šroubovici, což umožňuje využití větších posuvů.

Používají se na speciálních frézách s vodorovnou osou vřetena. Přesnost ozubení vyrobeného touto metodou a tímto nástrojem závisí na souosém upnutí frézy s osou vřetena stroje. Proto mají frézy vnitřní nebo vnější středící plochu. Profil břitu nástroje odpovídá zubní mezeře vyráběného ozubeného kola. [2, 1]



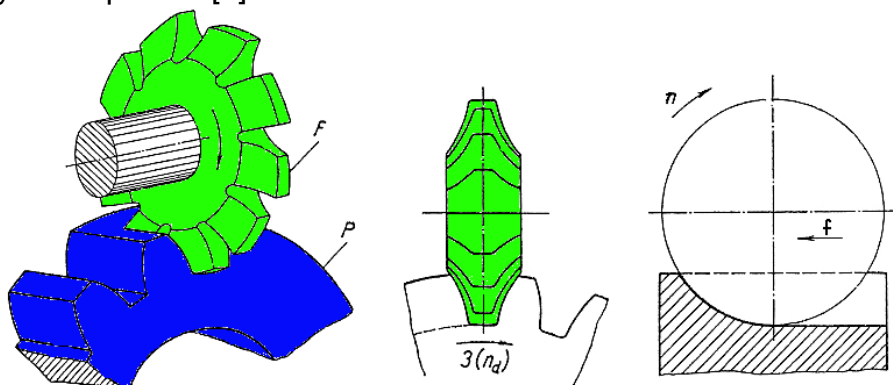
Obr. 16 Frézování ozubení stopkovou frézou [2]

F – fréza, P – obrobek, n – otáčky frézy, f – posuv frézy, $3(n_d)$ – dělicí pohyb obrobku

3.1.2 Frézování kotoučovou modulovou frézou

Kotoučová modulová fréza (obr. 17) se používá pro frézování ozubení dělicím způsobem u ozubených kol s přímými i šikmými zuby. Fréza koná hlavní

(rotační) řezný pohyb, stůl s obrobkem konají vedlejší řezný pohyb, pohybují se proti otáčení frézy. Obrobek musí být upnut v dělicím zařízení, které zajišťuje potřebný dělicí posun. [2]



Obr. 17 Frézování ozubení kotoučovou frézou [2]
 F – fréza, P – obrobek, n – otáčky frézy, f – posuv frézy
 $3(n_d)$ – dělicí pohyb obrobku

U menších modulů frézujeme zubní mezeru na jeden záběr, zatímco u větších modulů obvykle na dva záběry – jeden hrubovací s hrubovací kotoučovou frézou s odstupňovaným profilem a druhý načisto. Zubová mezeru se nejprve hrubuje, potom se kolo pootočí a frézuje se jeden bok zubu a totéž se následně opakuje pro druhý bok zubu. Po obrobení jedné zubové mezery se obráběné kolo pootočí o jednu rozteč a předešlý postup se opakuje.

U frézování šikmých zubů kotoučovou modulovou frézou je pracovní stůl stroje, na kterém je umístěn obrobek, natočen vzhledem k ose vřeteny o úhel sklonu zubů β_k . Kombinací podélného posuvu stolu a rotačního pohybu obrobku, který je odvozen od posuvového šroubu, vytváříme šikmé zuby.

Frézování pomocí tvarové kotoučové nebo čepové frézy řadíme mezi méně přesné metody výroby ozubených kuželových kol, jelikož se modul u kuželového soukolí lineárně zmenšuje směrem k vrcholu kužele. Frézování dělicím způsobem je vhodné zejména pro kusovou výrobu a to proto, že se zuby vytvářejí jeden po druhém. Profil dané frézy odpovídá profilu dané zubové mezery. Tvar zakřivení boků zubů fréz se mění podle počtu zubů kola, proto používáme několikačlenné sady fréz. Pro ozubení do modulu $m = 8$ používáme osmičlennou sadu pro každý modul. Pro moduly větší než $m = 8$ do $m = 20$ je sada patnáctičlenná, kdy každý člen je určen pro daný rozsah zubů. Výrobní náklady u této metody jsou díky tomu vysoké.

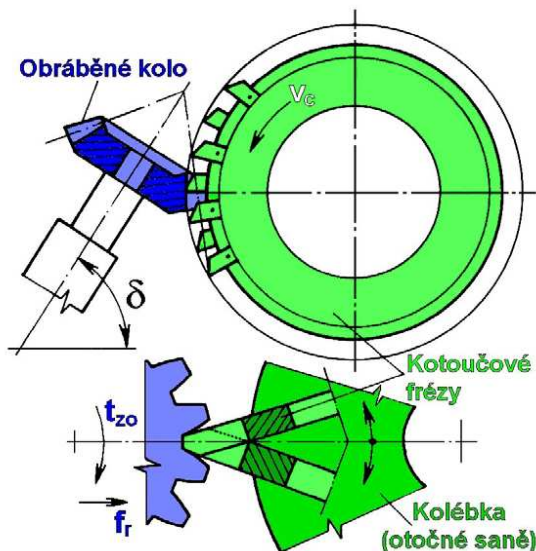
Dělicí způsob frézování se provádí na odvalovacích, univerzálních nebo speciálních frézách [1, 2, 4]

3.1.3 Frézování dvěma kotoučovými nožovými hlavami

U této metody, která se používá zejména při výrobě menších a středních rozměrů ($m = 0,3$ až 10 mm) kuželových kol s přímými a šikmými zuby se jako nástroj využívají dvě kotoučové nožové hlavy (pravá a levá) s mechanicky upnutými vsazenými břity, které se v zubové mezeře překrývají (obr. 18).

Zubová mezeru se vytváří zapichováním, kdy obrobek vykonává radiální posuv na hloubku zubu a frézováním boku zubu odvaelem, který je zajištěn

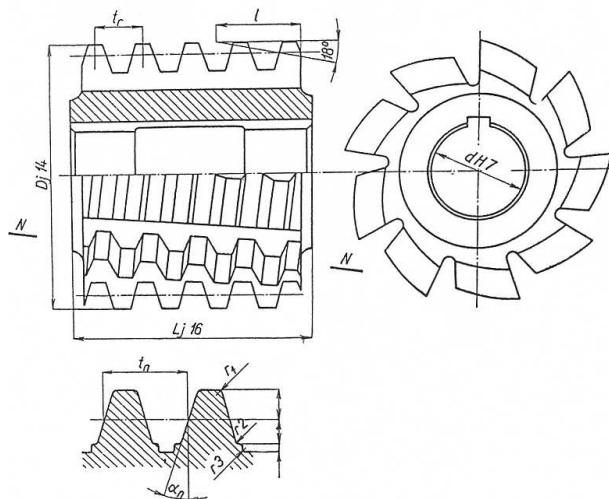
natáčením kolébky nebo odvalováním frézovacích hlav a natočením obráběného kola. Ozubení se zde frézuje dělicím způsobem. Tato metoda se používá pro frézování kol malé šířky. Zuby mají soudečkovitý tvar, zatímco zubové mezery mají tvar kruhového oblouku. [1, 4]



Obr. 18 Frézování kuželových kol dvěma kotoučovými nožovými hlavami [4]

3.1.4 Frézování odvalovací frézou

Frézování odvalovacím způsobem patří mezi nejpřesnější způsoby výroby ozubených kol. Všechny zuby odvalovací frézy (obr. 20) zabírají současně, proto je průběh frézování plynulý, klidný a bez rázů. Odvalovací frézování je založeno na principu záběru válcového šneku (odvalovací frézy) s ozubeným kolem, což představuje záběr šroubového soukolí. Nástrojem je odvalovací fréza, která má tvar evolventního šneku a jejíž profil v normálové rovině je tvořen základním hřebenem. Velkou výhodou odvalovacího frézování je, že s jedním nástrojem, tedy odvalovací frézou, lze obrábět ozubená kola stejného modulu s libovolným počtem a sklonem zubů. Touto metodou je výhodné obrábět čelní a šneková ozubená kola.



Obr. 20 Odvalovací fréza na čelní ozubení [2]



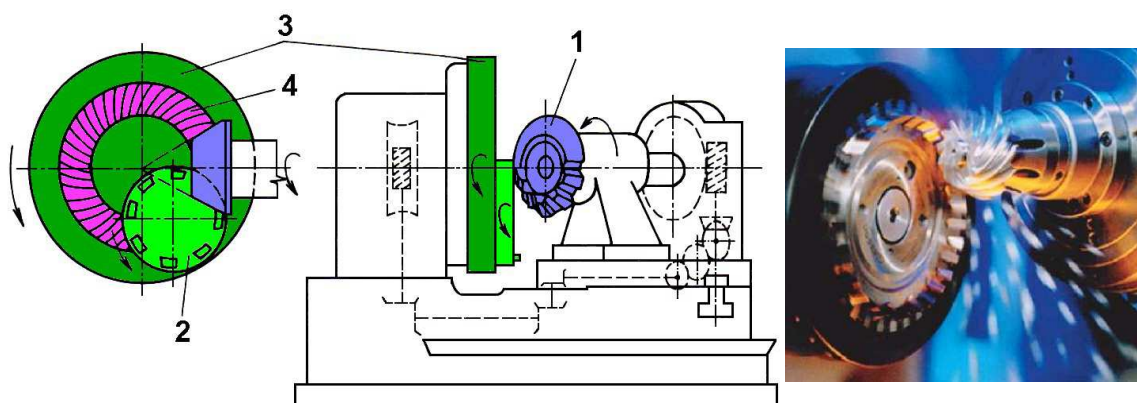
Obr. 19 Nástroje na výrobu ozubení [14]

Řezný pohyb je dán otáčením frézy a obrobku. Za jedno otočení frézy se obrobek pootočí o jednu rozteč. Obalové plochy jednotlivých poloh nástroje vytváří boky zubů vyráběného kola. Odvalovací fréza vykonává dva pohyby, řezný pohyb (otáčivý kolem své osy) a záběrný pohyb (posuvný napříč obrobku). Menší moduly se frézují do plné hloubky jedním záběrem, větší moduly na několik záběrů. [1, 2, 14]

3.1.5 Frézování čelní nožovou hlavou (způsob Gleason)

Tento způsob výroby kuželových kol je charakterizován, jako odvalovací frézování dělicím způsobem, kde jsou zuby vytvářeny pomocí čelní nožové hlavy (obr. 21). Princip obrábění vyplývá z dvoubokého odvalu (záběru) základního kola s obráběným ozubeným kolem. Základní kolo je nahrazeno unášecí deskou s čelní nožovou hlavou, která se otáčí řeznou rychlostí nezávisle na ostatních pohybech. Nože frézovací hlavy mají lichoběžníkový profil a jsou obvykle uspořádány s vystřídánými vnějšími a vnitřními břity za sebou. Kombinací otáčivého pohybu obrobku a natáčením unášecí desky s nožovou hlavou vzniká odvalovací pohyb.

Nejprve se obrobek přisune radiálně na hloubku zubové mezery a následně se odvalovacím pohybem frézuje celá zubová mezera. Dle převodového poměru záběru základního a obráběného kola se unášecí deska i nástroj otáčejí danými úhlovými rychlostmi. Odvalovací úhel musí být tak velký, aby se odvalila celá zubová mezera. Po tomto úkonu se obrobek odvalí od nástroje, změní se smysl otáčení unášecí desky a dojde k jejímu odvalení do výchozí polohy, kde se uskuteční dělení na další zubovou mezera, zapne se přísuv a celý cyklus se opakuje až do vyrobení celého ozubeného kola. [1, 4]

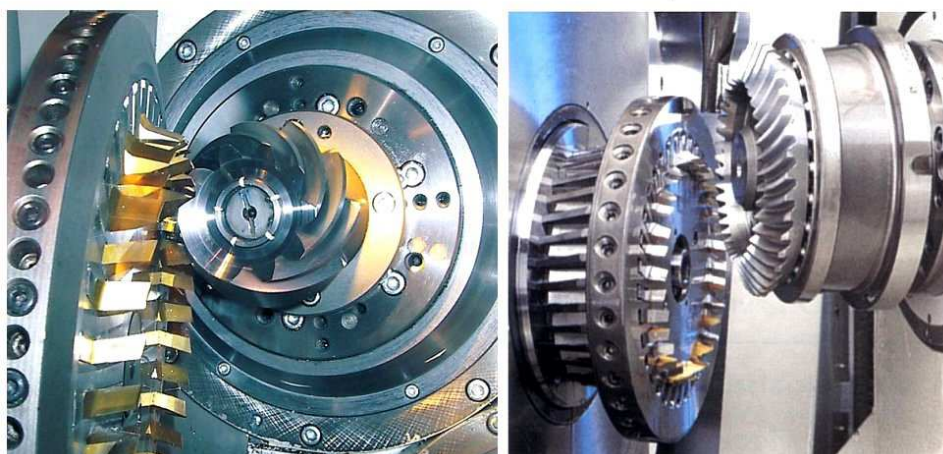
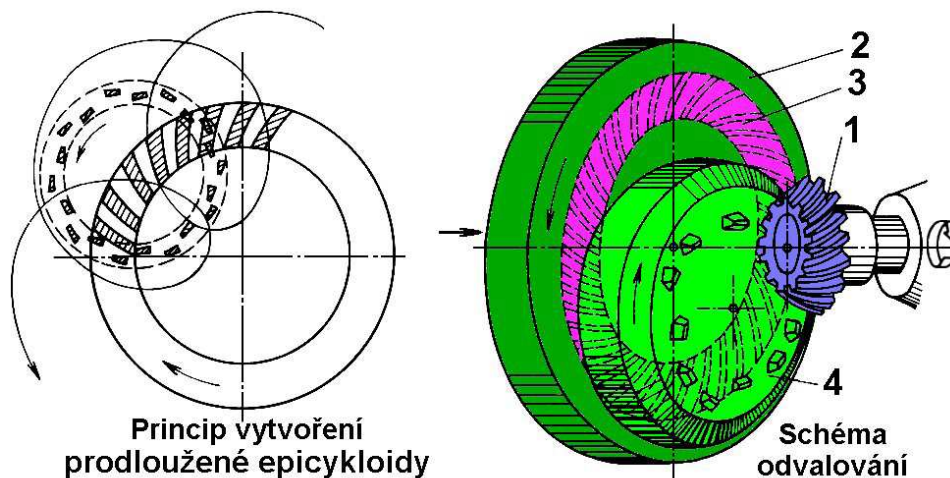


Obr. 21 Frézování kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Gleason [4, 9]
1 – obráběné kolo, 2 – nožová hlava, 3 – unášecí deska, 4 – pomyslné základní kolo

3.1.6 Frézování čelní nožovou hlavou (způsob Oerlikon)

Jedná se o odvalovací frézování čelní nožovou hlavou (obr. 22), která vytváří boky zubů obráběného kola plynulým odvalem. Výhodou je, že nejsou zapotřebí dělicí pohyby jako u metody Gleason. Kuželové ozubení vzniká kombinací tří na sobě závislých pohybů - rotační pohyb nožové hlavy, rotační pohyb obrobku, který je současně dělicím pohybem a natáčení kolébky, na

kteří je výstředně upnutá čelní nožová hlava, která má břity s přímkovým ostřím uspořádané ve skupinách tak, aby tvořily části samostatných spirál. [1, 4]

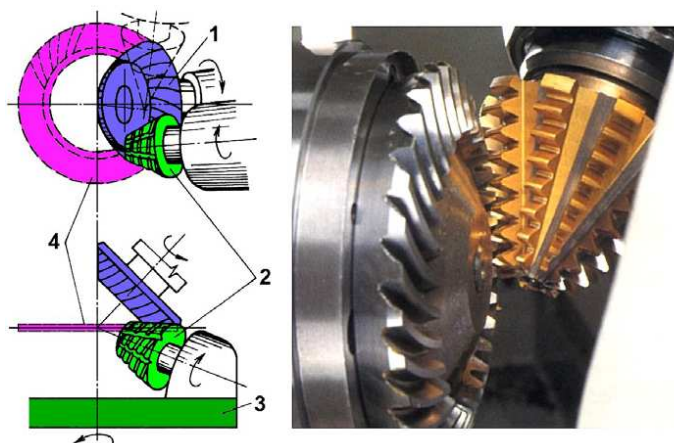


Obr. 22 Frézování kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Oerlikon [4]
1 – obráběné kolo, 2 – unášecí deska, 3 – pomyslné základní kolo, 4 – nožová hlava

3.1.7 Frézování kuželovou odvalovací frézou (způsob Klingelberg)

Tato metoda je charakterizována, jako odvalovací frézování kuželových kol plynulým odvalem kuželovou odvalovací frézou, která vytváří boky zubů (obr. 23). Kuželové ozubení vzniká jako u způsobu Oerlikon kombinací tří na sobě závislých pohybů - rotačního pohybu frézy, rotačního pohybu obrobku a odvalovacího pohybu frézy na unášecí desce. Tato metoda je vhodná pro kusovou a malosériovou výrobu.

Kuželová kola s cyklopaloidním ozubením se vyrábí odvalovacím frézováním čelní nožovou hlavou na podobném principu jako u metody Oerlikon. Rozdíl spočívá v konstrukci nožové hlavy, která je dvoudílná a uspořádána tak, že všechny vnější nože jsou umístěny v jedné části hlavy a vnitřní nože v druhé části. Obě části se mohou vzájemně posouvat, což umožňuje vytvářet křivky s různými poloměry křivosti. Jedná se o velmi produktivní způsob výroby kuželových kol menších a středních modulů. [1, 4]



Obr. 23 Frézování kuželových kol s paloidním ozubením metodou Klingelnberg [4]
1 – obráběné kolo, 2 – kuželová odvalovací fréza, 3 – unášecí deska, 4 – základní kolo

3.1.8 Přehled tvarových nástrojů pro výrobu ozubení

Tvar a rozměr zubů jsou závislé na modulu a jejich počtu, proto musí mít teoreticky každé ozubené kolo zvláštní nástroj. Prakticky se to dělá tak, že se pro jednu hodnotu modulu a určitý rozsah zubů volí stejný nástroj. Přesnost ozubených kol závisí na přesnosti nástroje a přesnosti dělení.



Obr. 24 Hrubovací a dokončovací nástroje od firmy Fette pro výrobu ozubení [19]

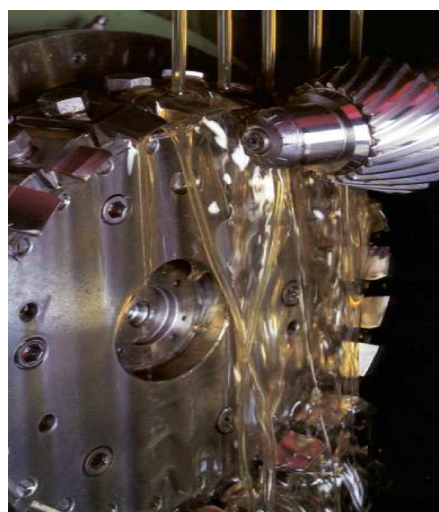
Počet, velikosti a kvalita ozubených kol, efektivita obráběcího stroje a samotná obrobitelnost jsou některé faktory ovlivňující výběr obráběcích nástrojů. Firma Fette vyrábí velkou škálu nástrojů, např. hrubovací a dokončovací frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů, monolitní frézy, odvalovací frézy s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutých karbidů atd. Výrobou kuželových ozubených kol se zabývají zejména výrobci Gleason a Klingelnberg.



Obr. 25 Nástroje na výrobu ozubení [4]:
1 - frézy Klingelnberg, 2 – obrážecí nože Fellows, 3 – ševingovací kolo, ostatní nástroje – odvalovací frézy



Obr. 26 Nožová hlava Oerlikon [18]



Obr. 27 Nožová hlava Gleason [17]

Tyto nástroje jsou proslulé svou kvalitou, jednotnou hloubkou zubu přes celou šířku zubu, dosahují vysoké přesnosti díky nepřetržité tvořící metodě.

3.2 Tvarové nástroje pro výrobu závitu

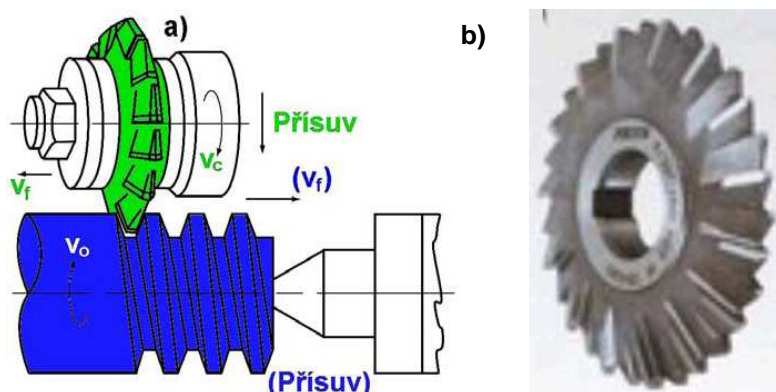
Ve strojírenské výrobě představují závity významné konstrukčně – technologické prvky strojírenských součástí, které se využívají pro různé spojovací nebo pohybové funkce. Přesnost a jakost závitů má často rozhodující vliv na správnou a spolehlivou funkci výrobku. Z technologického hlediska se výroba závitů dělí na obrábění vnějších a vnitřních závitů.

Výroba závitů frézováním ve srovnání s jinými metodami výroby závitů má řadu významných výhod. Například při porovnání výroby závitů klasickým závitníkem a obyčejnou celokarbidovou stopkovou frézou lze jednoznačně říci, že pomocí frézy je kvalita povrchu, tolerance a geometrie závitu mnohem vyšší. Při frézování jsou také dosahovány výrazně nižší řezné časy i řezné síly. V celkovém hodnocení vlastností, rozsáhlé oblasti nástrojů pro frézování závitů, lze specifikovat řadu optimalizačních prvků proti klasickým metodám výroby závitů. Mezi tyto optimalizační prvky patří např.: [12]

- Možnost zhotovení přesných závitů na CNC frézovacích strojích s použitím kruhových interpolačních programů
- Výroba kvalitních vnějších i vnitřních závitů situovaných mimo osu rotace nebo na nerotačních součástech
- Přesné závitování v tvrdých, těžkoobrobitelných a měkkých materiálech
- Možnost využití jediného nástroje pro výrobu různých průměrů závitů o stejném stoupání, v provedení pravém i levém
- Výrazné zkrácení obráběcího procesu na jediný průchod v délce závitu

3.2.1 Závrtová kotoučová fréza

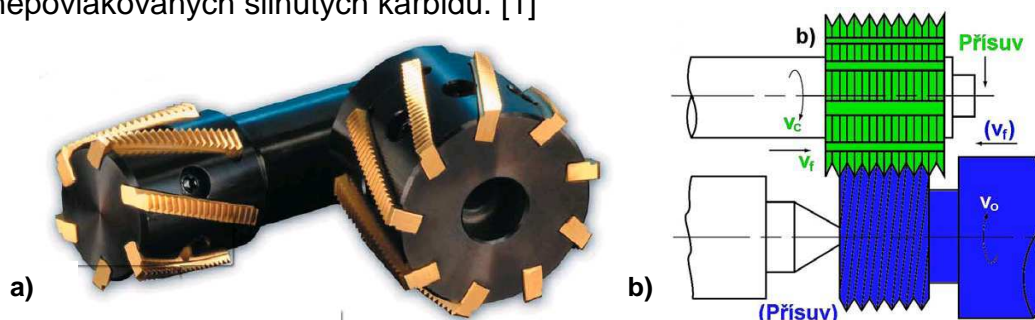
Jedná se o jednodřilové nástroje, které odpovídají negativnímu profilu vyráběného závrtu a které nacházejí uplatnění pro frézování dlouhých závrtů (např. pohybové šrouby). Fréza je vykloněna pod úhlem stoupání závrtu a má profil závrtové mezery. Obrobek nebo fréza se posune o jednu délku stoupání závrtu za jednu otáčku obrobku. Jako materiál závrtových kotoučových fréz se používá zpravidla rychlořezná ocel, která má řezné rychlosti v rozmezí 15 až 30 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. [1]



Obr. 28 Závrtová kotoučová fréza
a – princip obrábění [4]; b – fréza od firmy FETTE [19]

3.2.2 Závrtová hřebenová fréza

Tyto frézy se vyrábějí buď jako nástrčné nebo s kuželovou stopkou a využití naleznou u frézování kratších závrtů. Hřebenová fréza bývá o tři závrt delší než je vyráběný závrt a na svém obvodu má závrtový profil, který je přerušen přímými nebo šroubovitými drážkami. Vytvoření celého závrtu se provede na $1\frac{1}{4}$ až $1\frac{1}{2}$ otáčky obrobku. Obrobek i fréza konají rotační pohyb kolem své osy a také se musí posouvat relativně proti sobě ve směru osy závrtu za jednu otáčku obrobku o jedno stoupání frézovaného závrtu. Těmito nástroji se vyrábějí závrtů průměru 10 až 150 mm na speciálních strojích. Profil takto vytvořeného závrtu může být deformován, v závislosti s danou kinematikou a konstrukcí profilu nástroje. Nástroje bývají vyrobeny z rychlořezných ocelí, z povlakovaných a nepovlakovaných slintutých karbidů. [1]



Obr. 29 Závrtové hřebenové frézy
a – šroubovitá konstrukce od firmy STIM ZET [20]; b – princip obrábění [4]

Nová šroubová konstrukce u frézy (obr. 29a) umožňuje klidný proces obrábění při vysokých rychlostech posuvů a kratší čas na obrábění. Nástroje mají všeobecné využití, od malých součástek na malých obráběcích centrech až po těžko obrobitelné součástky na výkonných frézovacích strojích.

Šroubovitě drážky držáků nástrojů upnou 6 nebo 9 destiček na poměrně malý průměr. Metoda upnutí šrouby TORX umožňuje nejvhodnější polohu destičky. Tyto nástroje také dokážou snižovat vibrace a chvění. Destičky jsou buď v jakosti SK nebo HSS. [20]

3.2.3 Okružovací frézovací hlava

Umožňuje velmi produktivní způsob frézování dlouhých závitů. Nástroj zde zastupuje frézovací hlava s jedním až čtyřmi noži s profilem závitu. Frézovací hlava se otáčí a současně posouvá vzhledem k ose obrobku za jednu otáčku obrobku o jedno stoupání závitu. Nástroj má osu mimo střed osy obrobku a je vykloněný vůči ose obrobku o úhel stoupání závitu.

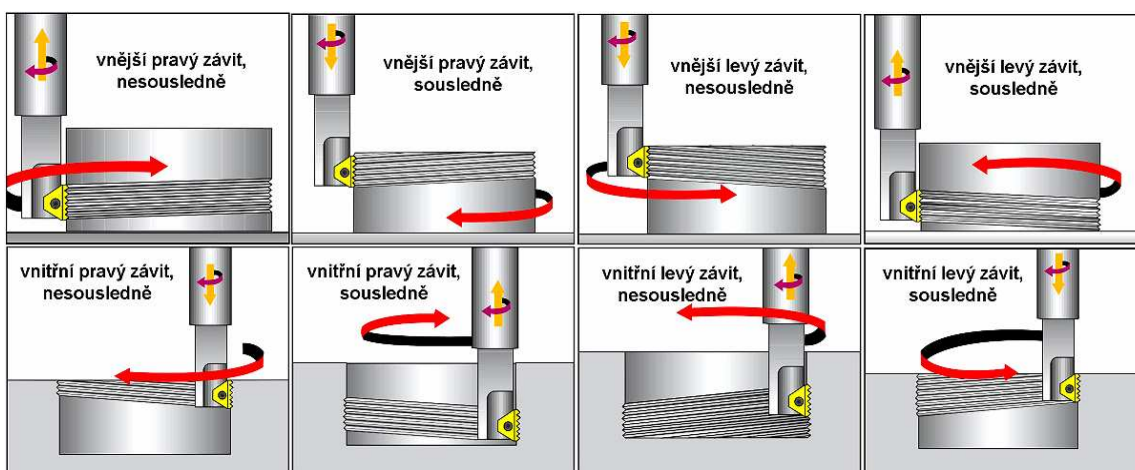
Závitová kotoučová fréza a okružovací frézovací hlava se používají hlavně pro výrobu vnějších závitů. Závitovou hřebenovou hlavu můžeme použít jak u vnějších tak u vnitřních závitů. Průměr frézy musí být menší než $2/3$ průměru vnitřního řezaného závitu. [1]

3.2.4 Stopkové závitové frézy

Můžou být v provedení s vyměnitelnými břitovými destičkami, nebo monolitní. Stopkové závitové frézy umožňují velmi produktivní obrábění dlouhých vnějších i vnitřních závitů (obr. 30). Jak je už výše uvedeno u vnitřního závitu musí být průměr frézy menší než $2/3$ průměru řezaného závitu. Fréza s mechanicky upnutou VBD z povlakovaného nebo nepovlakovaného SK (obr. 31) koná planetový rotační pohyb a současně se relativně posouvá vzhledem k ose obrobku o jedno stoupání závitu na jednu otáčku obrobku. Planetový rotační pohyb lze popsat rotací frézy kolem své osy a současně kolem osy obráběného závitu. VBD má hřebenovitý tvar s profilem odpovídajícího závitu. Při řezání delšího závitu se uvedená operace několikrát opakuje. Nástrojem s jedinou VBD lze vyrábět závity v určitém rozsahu průměrů a délek. Jako omezující faktory bychom mohli uvažovat stoupání závitu dané destičky a nutnost použití CNC obráběcího stroje, který musí být vybaven číslicovým řízením umožňující provádět kruhovou interpolaci. V dnešní době je tato funkce samozřejmostí. [4]

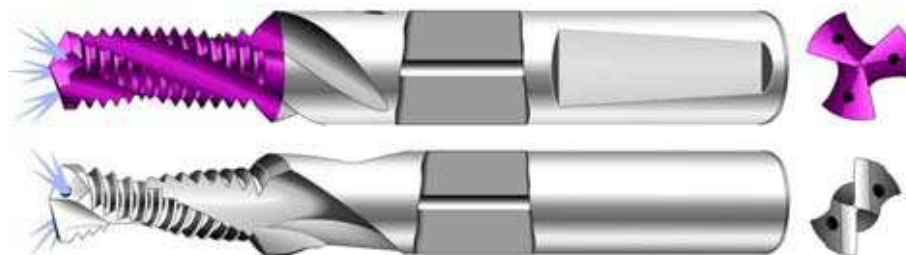


Obr. 30 Stopkové závitové frézy firmy Widia s VBD [4]



Obr. 31 Možné technologie výroby závitů pomocí frézy s VBD [4]

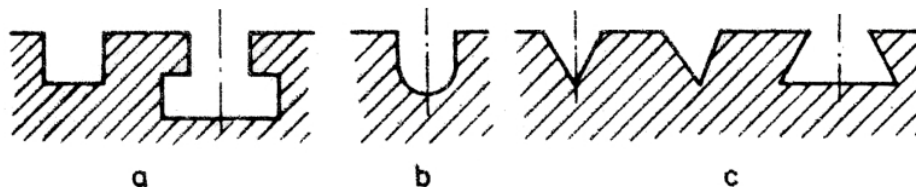
Jako příklad monolitní frézy bych uvedl vrtací závitové frézy BGF firmy Emuge - Franken v provedení povlakovaných a nepovlakovaných SK (obr. 32). Tyto frézy se hodí k výrobě vnitřních závitů. Dokážou vyvrtat díru, srazit hranu a vyfrézovat závit v průběhu jednoho pracovního cyklu bez výměny nástroje. Tím se ušetří náklady na vrták a záhlubník, ale hlavně čas na výměnu těchto nástrojů. Frézy BGF mají vnitřní přívod kapaliny využívané k odvádění třísek a k chlazení nástroje. Jsou vyráběny v provedení se dvěma nebo třemi šroubovitými drážkami. Tyto frézy použijeme u materiálu s krátkou drobnou třískou jako jsou litiny, hliník a jeho slitiny atd. [4]



Obr. 32 Monolitní SK vrtací závitové frézy BGF [4]

3.3 Tvarové nástroje pro drážky a jiné tvary

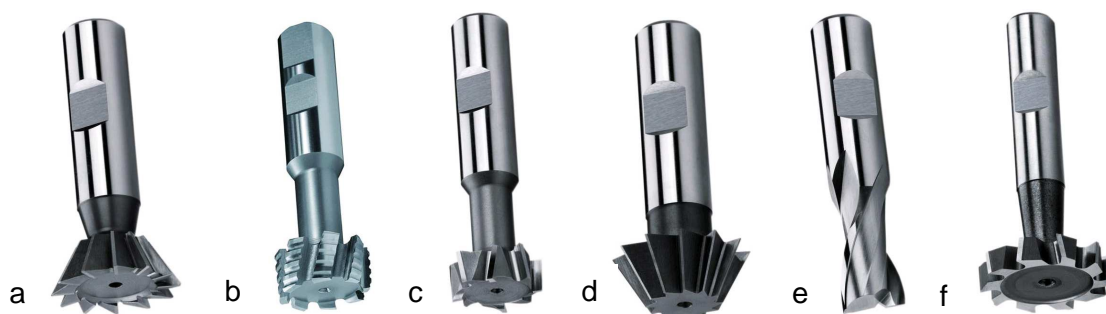
Nejčastěji frézovanými drážkami jsou drážky pravoúhle, rybinové a tvaru T.



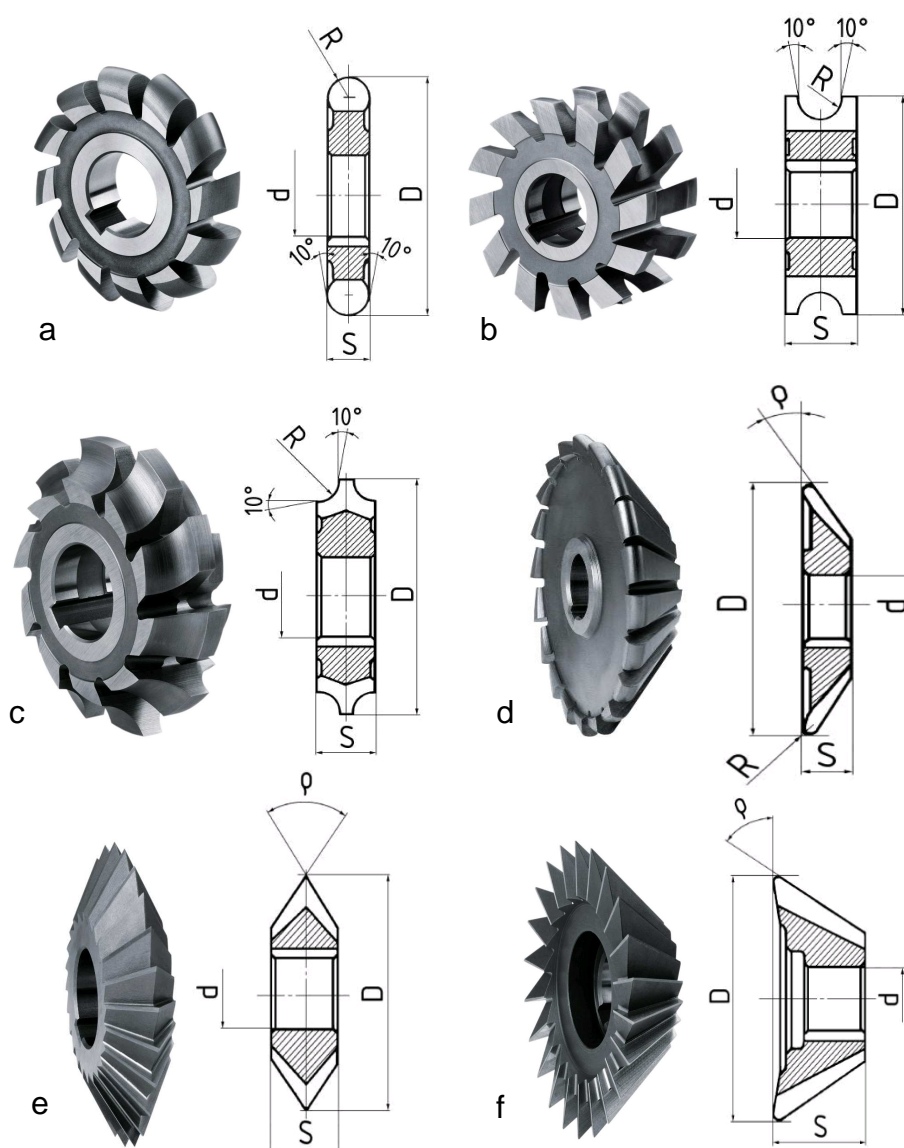
Obr. 33 Typy drážek [2]

a – pravoúhlé (tvaru U nebo T); b – tvarové (rádiusové); c – úhlové (souměrné, nesouměrné a rybinové)

Nástroje pro výrobu těchto tvarů mohou být v provedení nástrčném nebo s upínací stopkou (válcovou nebo kuželovou).



Obr. 34 Tvarové stopkové frézy z rychlořezné oceli od firmy ZPS [23]
 a – čelní úhlová fréza; b, c – frézy pro T drážky; d – úhlová fréza; e – fréza pro drážky
 per; f – fréza pro drážky úsečkových per



Obr. 35 Tvarové nástrčné frézy z rychlořezné oceli od firmy ZPS [23]
 a – fréza půlkruhová vypouklá; b – fréza půlkruhová vydutá; c - fréza čtvrtkruhová
 vydutá; d – fréza úhlová jednostranná; e – fréza úhlová oboustranná; f – fréza úhlová
 čelní

Těmito frézami můžeme obrábět jakékoliv tvary ať už normalizované nebo nenormalizované, pokud požadovaný tvar vytvoříme na hřbetě daného nástroje.

3.4 Výrobní stroje pro jednotlivé metody obrábění

3.4.1 Výrobní stroje používané pro výrobu ozubení

Na konstrukční řešení ozubárenských obráběcích strojů jsou kladeny specifické požadavky vyplývající z požadavků týkající se výroby konstrukčních prvků (ozubených kol). Mezi tyto požadavky patří například vysoká geometrická přesnost, vysoké pevnosti obráběných materiálů, tvrdost po tepelném zpracování nebo široký rozměrový sortiment, v kterém je zahrnut modul, počet zubů, vrtání, šířka zubu, tvar náboje a tvar zubů atd. Tyto stroje jsou významnou a konstrukčně zajímavou kategorií obráběcích strojů. Je to dáno zejména tím, že ozubená kola jsou nejpoužívanější součásti převodových systémů. Zavedení číslicového řízení (CNC technika) do této kategorie strojů, výrazně zjednodušuje kinematický řetězec konvečních strojů na ozubení. Zavedení CNC strojů má za následek vyšší pružnost při změně výroby, hospodárnější výrobu při malých sériích. Zjednodušení kinematiky strojů má přínos nejen ve snížení mechanické složitosti strojů, ale zejména umožňuje zvýšit tuhost a přesnost, protože vnitřní prostor stroje nemusí obsahovat různé složité mechanismy.

U odvalovacího způsobu výroby ozubených kol lze obrábět přerušovaně, to znamená, že se vytvoří několik zubů plynulým odvalem a poté se pracovní cyklus opakuje, nebo plynule, kdy se všechny zuby vyrobí najednou, bez přerušování cyklu. Poslední metodou je výroba ozubených kol dělením, kdy se vytvoří jeden zub nebo zubová mezera. U odvalovacích frézek musí být posuv vázán na otáčení stolu. Kinematika pohonu CNC odvalovacích frézek je dosti zjednodušená, kdy všechny základní souřadnice pro dosažení vázaného odvalovacího pohybu (rotace nástroje, otáčení obrobku, axiální posuv sání) mají své samostatné pohonné motory.

U tvarového způsobu obrábění musejí být stroje vybaveny dělicím zařízením umožňující dělení dle počtu vyráběných zubů. [9]



Obr. 36 Odvalovací frézka na ozubení OFA 32 CNC 6 [16]

Základní charakteristika stroje:

Výrobce stroje je firma TOS Čelákovice a.s. Jedná se o svislou odvalovací frézku na ozubení pro výrobu ozubených kol čelních s přímými i šikmými zuby, řetězových kol frézovaných radiálním i tangenciálním způsobem a jiných způsobů ozubení frézovaných odvalovacím způsobem. Stroj je vhodný pro kusovou i sériovou výrobu. Je vybaven řídicím systémem Sinumerik 840 C a pohony od firmy Siemens. Má 6 řízených os.



Obr. 37 Obráběcí stroj pro výrobu kuželových kol PHOENIX® II 275HC [17]

Základní charakteristika stroje:

Výrobce stroje je firma Gleason. Jedná se o stroj nové generace s monolitickým sloupovým designem. Díky konstrukci je poměrně mály ve srovnání s velikostí vyráběných kol.



Obr. 38 Univerzální obráběcí stroj pro výrobu kuželových kol Oerlikon C 100 U [18]

Základní charakteristika stroje:

Výrobce stroje je firma Klingelberg. Základní výbavou tohoto stroje je frézovací hlava s dělicí výbavou. Jako jeden z cyklopaloidních strojů s jeho všestranným vybavením představuje vhodný stroj pro výrobu šroubového ozubení, hypoidní kuželová kola atd.

3.4.2 Výrobní stroje používané pro výrobu závitů

Při frézování dlouhých pohybových šroubů se většinou používají speciální frézovací stroje, zatímco pro kratší šrouby můžeme využít frézek univerzálních konzolových opatřených dělicím přístrojem.

Okružovací frézování se uskutečňuje na speciálních strojích nebo na soustruzích s přídatným zařízením.

3.4.3 Výrobní stroje používané pro výrobu drážek

Obecně drážky můžeme frézovat na frézkách svislých nebo vodorovných. V sériové výrobě se používají speciální drážkovací frézky, které jsou sice dražší jednoúčelové stroje, ale jsou výkonnější, což se do počtu vyrobených drážek týká. Jelikož každá z drážek má plochy, které nejsou během frézování rovnoběžné s plochou stolu frézky, měl by být obrobek ustaven do polohy rovnoběžné s posuvem stolu frézky.

Všeobecně se v dnešní době podniky snaží nakoupit nová vyspělá obráběcí centra, na kterých lze vyrábět téměř všechno. Záleží na výrobním směru podniku, zda se mu vyplatí speciální stroj pro výrobu např. závitů, nebo zda pořídit univerzální obráběcí centrum. Velkou roli v rozhodování bude hrát finanční stránka podniku, také počet zakázek neboli sériovost výroby.

3.4.4 Vysvětlení pojmu 1D až 5D u frézovacích strojů:

Pro hodnocení konstrukční vyspělosti obráběcího centra (stroje) se jako jeden z hlavních faktorů používá počet os souřadnicového systému, které mohou být při obrábění současně v činnosti.

- *Jednoosé obrábění (1 D):*

Charakteristický je pohyb po jedné ose, např. stroj pro vrtání.

- *Dvouosé obrábění (2 D):*

Charakteristický je pohyb ve dvou osách najednou, u frézky X, Y.

- *2,5 D obrábění:*

U frézky při najetí na hloubku třísky (osa Z) a následné obrábění v osách X, Y.

- *Třiosé obrábění (3 D):*

Charakteristický je pohyb ve třech osách X, Y, Z řízených současně, tzv. tříosá frézka.

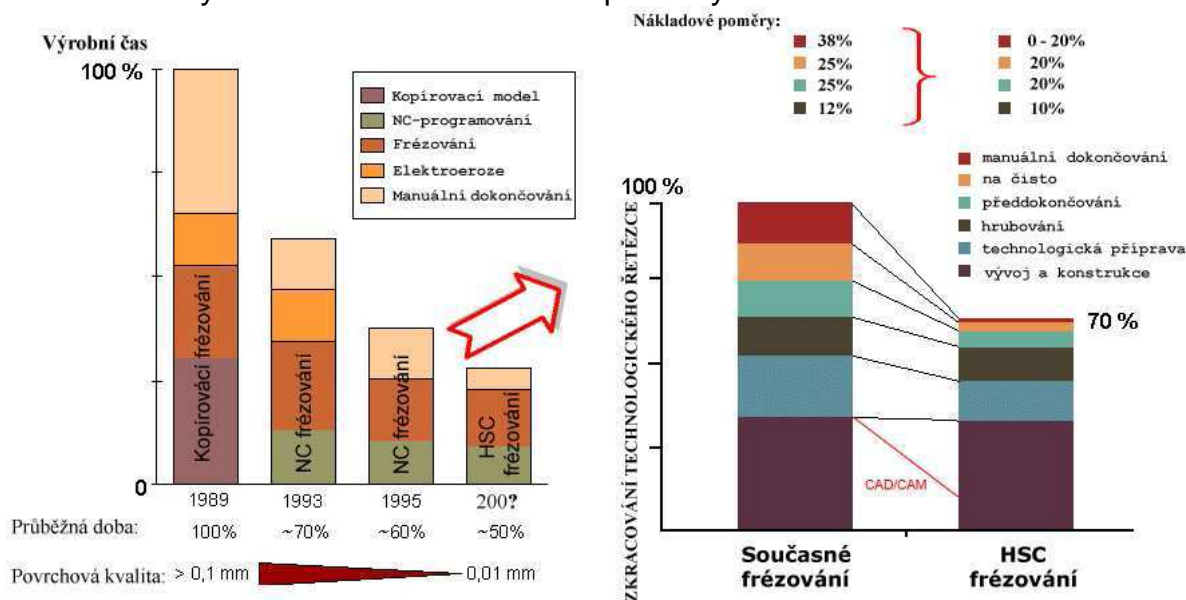
- *Pětiosé obrábění (5 D):*

Charakteristický je pohyb v pěti osách najednou, posuvy v osách X, Y, Z. K řešení dalších dvou os může být použito: otočného stolu s možností naklápění, nebo použitím přídatného zařízení na stole (kolébka) anebo výkyvem frézovací hlavy ve dvou osách. [15]

4 POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH METOD VÝROBY TVAROVÝCH PLOCH

4.1 Porovnání konvenčního a HSC frézování

Nasazení vysokorychlostního frézování do procesu výroby forem a zápusťek z tepelně zpracovaných ocelí, se projevuje značným zkrácením a zjednodušením výrobního řetězce. Na obr. 39 si můžeme všimnout výhod HSC frézování vzhledem k současnému konvenčnímu frézování. Mezi významné výhody patří zkracování technologického řetězce až o 30 %. Dále pak náklady při použití HSC frézování výrazně klesají. Výrobní čas je závislý na použité metodě obrábění. Jak je z grafu patrné u HSC frézování klesl zhruba o 70%. Vývoj v obráběcím procesu výrazně stoupl, což je zřejmé z grafu, na kterém vidíme, že povrchová kvalita dosahuje mnohem přesnějších rozměrů než v devadesátých letech a to dokonce s úsporou výrobního času.



Obr. 39 Potenciál HSC frézování v oblasti výroby forem a zápusťek [6]

Jako další výhody HSC obrábění bych uvedl [11] :

- se zvyšujícími se otáčkami vřetena je umožněna vyšší rychlost posuvu při stejné tloušťce třísky než při konvenčním obrábění
- vytvářená tříska je obvykle krátká, kompletně segmentovaná díky omezenému času záběru ostří u frézování.
- snížení tepelného účinku, neboť rychlost odchodu třísky nedovolí přestupu tepla do nástroje a obrobku, proto mohou být obráběny tepelně citlivější materiály
- kvalitní povrch obrobené plochy a podpovrchové vrstvy po obrobení může vést ke zrušení následných dokončovacích operací

HSC technologie mají i své nevýhody [11] :

- pro všechny druhy materiálů nejsou dostatečně odzkoušena technologická data
- na zajištění dostatečné bezpečnosti obsluhujícího personálu je třeba vynaložit vyšší náklady

4.2 Porovnání kopírovacího frézování a frézování tvarovým nástrojem

Výhody frézování tvarovým nástrojem:

- vysoká produktivita u sériových zakázek
- možnost vyrobit tvarový nástroj různých tvarů

Nevýhody frézování tvarovým nástrojem:

- drahá výroba nástrojů
- jednoúčelové použití těchto nástrojů
- mnohačlenné sady nástrojů
- obráběcí stroje mohou být univerzální, ale většinou se používají jednoúčelové stroje

Výhody kopírovacího frézování:

- možnost vyrábět velkou škálu výrobků
- použití univerzálních nástrojů
- široké uplatnění ve většině firem, díky mnohostrannosti obráběcích strojů a řezných nástrojů

Nevýhody kopírovacího frézování:

- v dnešní době nutnost řídicího systému a obráběcího centra
- k zajištění kvalifikovaného obsluhujícího personálu je třeba vynaložit vyšší náklady
- vyšší pořizovací ceny obráběcích center

Základní rozdíl mezi oběma principy je, že u kopírovacího frézování se přenáší tvar obrobku z modelu nebo dřívě z šablony na obráběnou součást, kdežto u tvarového nástroje je tvar tvarové plochy vytvořen na hřbetu nástroje. Další rozdíly jsou patrné z výhod a nevýhod sepsaných výše. Tyto dvě metody se těžko srovnávají, protože se používají pro výrobu odlišných tvarových ploch. Metodou kopírovacího frézování se můžeme pokusit vyrobit ozubené kolo, ale ve srovnání s výrobou pomocí tvarového nástroje budou náklady mnohonásobně vyšší, protože se bude jednat o složitý a časově náročný obráběcí proces na CNC obráběcím centru za použití více nástrojů.

5 ZÁVĚR

V této práci jsou postupně v jednotlivých kapitolách popsány významné metody frézování, používané stroje a nástroje při obrábění tvarových ploch, rozdělení a definování tvarové plochy. Porovnání a zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých technologií obrábění najdete v poslední kapitole.

U jednotlivých metod frézování tvarových ploch dochází k pokroku díky neustále se rozvíjejícímu strojovému vybavení a rozvíjejících se technologií při vývoji nových nástrojů, jejich materiálů a vlastností. S vývojem CNC obráběcích center stoupla produktivita obrábění a postupně klesá i čas výroby. Strojírenství je hojně zastoupeno v průmyslu a konkurence je zde velmi výrazná, proto se jednotlivé podniky musí snažit neustále inovovat své produkty. Trend výzkumu a vývoje nových nástrojových materiálů a tvarů nástrojů pokračuje a do budoucna jen tak neskončí. U nových nástrojů se snažíme docílit výraznějšího úběru materiálu, čímž se zvýší výkony jak v ekonomické tak i ve výrobní sféře podniku.

Shrnutí frézovacích postupů určené pro frézování tvarových ploch je provedeno v tabulce 1. Použitím vhodných kombinací postupů u obrábění lze dosáhnout snížení času obrábění, zvýšení životnosti nástroje, zlepšení kvality povrchu a v neposlední řadě také ovlivnit rozměrovou přesnost obrábění. Využití kruhových tvarů břitů nástroje a zásadně sousledného frézování je výhodné z hlediska zbytkových objemů a rovnoměrných přídavek na obráběné ploše. Neměli bychom opomenout také strategie (postupy) frézování vnitřních rohů a zásady pro vstup a výstup břitu z řezu. Důležité je zvolit danou strategii dle konkrétního charakteru vyráběné tvarové plochy a nezapomenout na geometrickou a tvarovou přesnost a celistvost povrchu včetně jeho drsnosti.

Tab. 1 Frézovací postupy

Frézovací postupy	Použití
kapsování	hrubování
spirálové frézování	dokončování rovinných ploch
vrstevnicové frézování	dokončování svislých ploch
žlábkování	vnitřní rohy, úzké a hluboké dutiny
lineární pohyb nástroje	obrábění rohů
kruhová interpolace	obrábění rohů

HSC tvrdé frézování představuje inovační výrobní postup při výrobě forem a zápusťek, ve kterém je ukryt nesmírný potenciál. Plného využití však tato technologie poskytne jen tehdy, je-li výrobní řetězec optimálně vybudován. Bez vhodného postupu určeného pro HSC tvrdé frézování by např. speciální obráběcí centrum nebylo plně využité a docházelo by k zbytečným nákladovým ztrátám. To samé platí i naopak, kdy bez vhodných strojů je i ten nejlepší software bezcenný.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOČMAN K, PROKOP J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
2. VAŇÁK, A. *Technologie frézování : pracovní listy*. Šumperk : [s.n.], 2007. 34 s. Dostupný z WWW: <www.sossou-spok.cz/esf/TEC_fr.pdf>.
3. ZEMČÍK, O. *Technologická příprava výroby*. Brno : Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
4. HUMÁR, A. *Technologie I : Technologie obrábění - 2.část*. [s.l.] : [s.n.], 2004. 95 s. Dostupný z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/?page=opory>>.
5. NOVOTNÝ, K, ZEMČÍK, O. *Přípravky a nástroje : Učební texty kombinovaného bakalářského studia*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 119 s. Dostupný z WWW: <<http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/PripravkyNastroje.pdf>>.
6. SKOPEČEK, T. *Příspěvek k optimalizaci obrábění forem a zápustek z tepelně zpracovaných nástrojových ocelí "HSC - tvrdé frézování"*. [s.l.], 2005. 114 s. Západočeská univerzita v Plzni. Dizertační práce.
7. KOVÁŘ, J. *Teorie a praxe vysokorychlostního frézování : Zkrácená verze Ph.D. Thesis*. [s.l.] : [s.n.], 2008. 27 s. ISBN 978-80-214-3832-3.
8. OTÁHAL, D. *Progresivní metody frézování a jejich vliv na proces řezání*. [s.l.], 2007. 98 s. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní. Dizertační práce.
9. MAREK, J. *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. 1. Vydání , MM průmyslové spektrum , 2006 , 282 s. , ISSN 1212-2572.
10. SKOPEČEK, T, HOFMANN, P. Frézovací strategie při výrobě forem a zápustek. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 5 [cit. 2009-04-27]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapustek>>.
11. ZEMAN, P, ŠAFEK, J, VANĚČEK, D. Technologie HSC. *Technik : Technické a technologické novinky pro výzkum, výrobu a trh* [online]. 2002 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <http://technik.ihned.cz/c4-10004030-11353150-800000_d-technologie-hsc>.
12. Frézování závitů nástroji firmy ISCAR. *Technický týdeník* [online]. 2006, č. 18 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=1264&mark=>>>.

13. INSELMANN, J. HSC při obrábění. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2005, č. 12 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/hsc-pri-obrabeni-forem>>.
14. *Výroba ozubených kol, přednáška 3.* [online]. Ústav konstruování FSI VUT Brno, 2009, [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.uk.fme.vutbr.cz>>.
15. *B3kovo* [online]. 2007 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <<http://b3kovo.cz/cnc-informace-1d5d/>>.
16. *Obráběcí stroje* [online]. [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/vyuka/katalog/kat/view0_1.html>.
17. *Gleason* [online]. 2006 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.gleason.com/bevel_phxII275HC.html>.
18. *Klingelberg* [online]. 2007 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.klingelberg.info/en/produkte/c_100u.php>.
19. *LMT Fette* [online]. 1995 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <http://www.fette.de/rd_fpn/58_ENG_Run.html>.
20. *Ostrava nástroje : Katalog frézování závitů* [online]. 2008 [cit. 2009-04-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.ostravanastroje.cz/nastroje/divize-nastroju-a-naradi/rezne-nastroje/10/>>.
21. *RHP series : more precise, rigid and faster* [online]. 2005 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <globatex.ru/files/image/equipment/2023550815.pdf>.
22. *Jirka & spol.* [online]. 2007 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.jirkaspol.cz/hsc-centra-222.html>>.
23. *ZPS-Frézovací nástroje* [online]. 2008 [cit. 2009-05-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.zps-fn.cz/>>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Metody výroby forem a zápustek [6]	12
Obr. 2 Obecný pohled na použití HSC tvrdého frézování [6]	15
Obr. 3 Modelový příklad optimalizace procesního řetězce [6].....	16
Obr. 4 Obráběcí centrum RHP 800 [21].....	18
Obr. 5 Obráběcí centrum HSD 820 [22].....	18
Obr. 6 Provedení nástrojů pro obrábění forem a zápustek [6]	19
Obr. 7 Další provedení nástrojů pro obrábění forem a zápustek [6].....	20
Obr. 8 Poměrové rozložení odcházejícího tepla [11]	20
Obr. 9 Různé příklady hrubovacích postupů [6].....	21
Obr. 10 Optimální frézovací postupy při obrábění na čisto [6]	22
Obr. 11 Porovnání postupů pro obrábění šikmých ploch [6]	23
Obr. 12 Metody najíždění do řezu [6].....	24
Obr. 13 Význam využití víceosého frézování [6].....	25
Obr. 14 Typické příklady obrábění kopírovací frézou [8].....	25
Obr. 15 Základní tvar zubů frézy - podtáčená plocha [5]	26
Obr. 16 Frézování ozubení stopkovou frézou [2].....	27
Obr. 17 Frézování ozubení kotoučovou frézou [2].....	28
Obr. 18 Frézování kuželových kol dvěma kotoučovými nožovými hlavami [4].....	29
Obr. 19 Nástroje na výrobu ozubení [14]	29
Obr. 20 Odvalovací fréza na čelní ozubení [2].....	29
Obr. 21 Frézování kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Gleason [4, 9].....	30
Obr. 22 Frézování kuželových kol se zakřivenými zuby způsobem Oerlikon [4].....	31
Obr. 23 Frézování kuželových kol s paloidním ozubením metodou KlingelInberg [4]	32
Obr. 24 Hrubovací a dokončovací nástroje od firmy Fette pro výrobu ozubení [19]	32
Obr. 25 Nástroje na výrobu ozubení [4]:	32
Obr. 26 Nožová hlava Oerlikon [18].....	33
Obr. 27 Nožová hlava Gleason [17].....	33
Obr. 28 Závitová kotoučová fréza	34
Obr. 29 Závitové hřebenové frézy	34
Obr. 30 Stopkové závitové frézy firmy Widia s VBD [4]	35
Obr. 31 Možné technologie výroby závitů pomocí frézy s VBD [4].....	36
Obr. 32 Monolitní SK vrtací závitové frézy BGF [4].....	36
Obr. 33 Typy drážek [2]	36
Obr. 34 Tvarové stopkové frézy z rychlořezné oceli od firmy ZPS [23].....	37
Obr. 35 Tvarové nástrčné frézy z rychlořezné oceli od firmy ZPS [23]	37

Obr. 36 Odvalovací frézka na ozubení OFA 32 CNC 6 [16].....	38
Obr. 37 Obráběcí stroj pro výrobu kuželových kol PHOENIX® II 275HC [17]...	39
Obr. 38 Univerzální obráběcí stroj pro výrobu kuželových kol Oerlikon C 100 U [18].....	39
Obr. 39 Potenciál HSC frézování v oblasti výroby forem a zápustek [6].....	42

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Frézovací postupy	44
--------------------------------	----

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka/Význam	Popis
AC	Alternating Current	střídavý pohon
CAD	Computer Aided Design	konstruování pomocí počítače
CAM	Computer Aided Manufacturing	počítačem podporovaná výroba
CNB		kubický nitrid bóru
CNC	Computer Numerical Control	počítačové číslicové řízení
CVD	Chemical Vapour Deposition	chemická metoda povlakování
HSC	High Speed Cutting	vysokorychlostní obrábění
HSS	High Speed Steel	rychlořezná ocel
MT-CVD	Mean Temperature Chemical Vapour Deposition	chemická metoda povlakování
NC	Numerical Control	číslicové řízení
PVD	Physical Vapour Deposition	fyzikální metoda povlakování
SK	Sintered Carbide	slinutý karbid
TORX		metoda upínání
VBD		vyměnitelná břitová destička
M	[-]	modul
β_k	[°]	úhel sklonu boku zubu